

Andreas Ueberschaer

Lichtfarbe in der Straßenbeleuchtung

Laborstudie zur Bestimmung von Detektionsschwellen bei normalen und durch Regen und Blendung erschwerten Sehbedingungen

URN: urn:nbn:de:gbv:ilm1-2017200367

Zuerst als Druckausgabe erschienen:

Ueberschaer, Andreas:

Lichtfarbe in der Straßenbeleuchtung : Laborstudie zur Bestimmung von Detektionsschwellen bei normalen und durch Regen und Blendung erschwerten Sehbedingungen / Andreas Ueberschaer. - Friedrichstadt : Der Andere Verlag, 2016. - XVII, 178 Seiten.

(Publikationsreihe des Fachgebietes Lichttechnik in Ilmenau ; Nummer 18)
ISBN 978-3-86247-610-7

Lichtfarbe in der Straßenbeleuchtung

—
**Laborstudie zur Bestimmung von Detektionsschwellen bei normalen
und durch Regen und Blendung erschwerten Sehbedingungen**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur

(Dr.-Ing.)

vorgelegt der

Fakultät für Maschinenbau

Technische Universität Ilmenau

von Herrn

Dipl.-Ing. Andreas Ueberschaer

geboren am 01.01.1981 in Kassel, Deutschland

Datum der Einreichung:

19. November 2015

Datum der öffentlichen wissenschaftlichen Aussprache:

29. Juli 2016

1. Gutachter:

Univ.-Prof. Dr. sc. nat. habil. Christoph Schierz

Technische Universität Ilmenau

2. Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Roland Greule

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

3. Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Stephan Völker

Technische Universität Berlin

„Eine der wichtigsten Einsichten, die wir der modernen Physik zu verdanken haben, ist die der Einheit zwischen dem Beobachter und dem Gegenstand seiner Beobachtung: Der Mensch, der das Experiment durchführt – das beobachtende Bewusstsein – kann nicht von dem beobachteten Phänomen getrennt werden, und eine andere Art des Zuschauens wird bewirken, dass sich das beobachtete Phänomen anders verhält.“

ECKHART TOLLE

Vorwort

Das Unterfangen zur Anfertigung dieser Dissertation gleicht dem Beschreiten eines Lebensweges, den ich in den letzten sechs Jahren, vorwiegend als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität (TU) Ilmenau, gegangen bin. Während dieser Zeit durfte ich viele wertvolle Erfahrungen sammeln. Diese waren nicht nur fachlicher sondern auch sozialer Natur. Während die positiven Erfahrungen mich in meinem Denken und Handeln bestärkten, zeigten mir die Negativen die Grenzen meiner Arbeitsweise auf. Rückblickend ist so ein Weg aus Geraden, Windungen und Sackgassen, mal eben und mal holprig, mit einem wechselhaften Höhenprofil entstanden. Dieser Weg erreicht nun sein Ziel.

Ich möchte dies zum Anlass nehmen, um mich bei all jenen Personen zu bedanken, die mir während des Beschreitens dieses Weges Stolpersteine nahmen, Rückenwind bei Steigungen spendeten und mich vor Sackgassen und falschen Abzweigungen warnten. An dieser Stelle danke ich insbesondere den Mitarbeitern und ehemaligen Kollegen des Fachgebiets Lichttechnik der TU Ilmenau für die fachlichen und persönlichen Gespräche. Ebenso gilt mein Dank den Versuchspersonen für deren zuverlässige Teilnahme an den Untersuchungen. Vielen Dank!

Besonders hervorzuheben sind nachfolgende Personen, die durch ihre unermüdliche Unterstützung über die gesamte Weglänge hinweg maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Mein besonderer Dank gilt:

- meinem Doktorvater Professor Christoph Schierz. Vielen Dank!
- meinen beiden Bürokollegen, Andreas Walkling und Felix Börner, für die konstruktiven Diskussionen sowie die familiäre Arbeitsatmosphäre. Vielen Dank!
- meinem Kollegen Matthias Menz für sein kreatives und handwerkliches Geschick in der Bearbeitung praktischer Dinge. Vielen Dank!

Weiterhin danke ich Professor Roland Greule und Professor Stephan Völker für die Übernahme der Korreferate. Vielen Dank!

Abschließend gilt mein ganz besonderer Dank meiner Familie. Meiner Lebensgefährtin Friderika danke ich für ihren starken emotionalen und psychischen Rückhalt. Meinem Bruder Roman danke ich für seine Unterstützung bei Fragen und Zweifeln zu meinem Promotionsvorhaben. Nicht unerwähnt lassen möchte ich meine Eltern, Ursula und Herbert, die diesen Lebensweg leider nicht mehr (vollständig) begleiten konnten.

Herzlichen Dank!

Kurzfassung

Aktuelle Technologien im Bereich der Leuchtmittelentwicklung und Lichtsteuerung ermöglichen eine hohe Vielfalt an Lichtfarben, die bedarfsweise auch im laufenden Betrieb eines Beleuchtungssystems variiert werden können. Durch diese Entwicklung wird die Lichtfarbe zu einem eigenständigen Parameter, der in der Straßenbeleuchtungspraxis bisher wenig oder keine Berücksichtigung findet und den es daher zu bewerten gilt.

Diese Arbeit nimmt sich der Thematik an und untersucht den Einfluss der Lichtfarbe auf die Sehleistung mit dem Ziel, neue wissenschaftliche Erkenntnisse zur Verbesserung der Objektdetektion im Anwendungsgebiet der Straßenbeleuchtung zu generieren.

In einer Laborstudie wurde eine physiologische Schwellenuntersuchung mit einem 32 Personen umfassenden Kollektiv durchgeführt. Der angewandte Forschungsansatz sieht einen starken Praxisbezug vor. So wurde die Objektdetektion bei drei, für die Straßenbeleuchtungspraxis näherungsweise typischen, Leuchtdichteniveaus (0,3; 1,0; 3,0 cd/m²) und jeweils vier Lichtfarben (2500 K; 4000 K; 6000 K; Mint) an insgesamt sechs Objektpositionen bestimmt. Zudem wurden auch durch Regen und physiologische Blendung hervorgerufene, erschwerte Sehbedingungen berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Untersuchungen bestätigen, dass die Detektionsschwelle mit zunehmender Adaptationsleuchtdichte und zunehmendem Peripheriewinkel der Sehobjekte ansteigt. Hinsichtlich der Lichtfarbe zeigt sich eine deutliche Reduktion der Detektionsschwelle bei der höchsten Farbtemperatur für nahfoveale Sehobjekte. Dieser Einfluss kehrt sich für periphere Sehobjekte um. Unter erschwerten Sehbedingungen konnte für Blendung gezeigt werden, dass die in der Straßenbeleuchtungspraxis verwendete Bewertungsmethode die Blendwirkung in Abhängigkeit der Objektposition über- bzw. unterschätzt. In Kombination mit Regen zeichnet sich tendenziell ab, dass ein Regenereignis mit kleinerem Tropfendurchmesser (Sprühregen) zu einer stärkeren Beeinträchtigung der Sehleistung führt.

Aus den in dieser Arbeit erzielten Ergebnissen geht hervor, dass die Lichtfarbe einen nicht zu vernachlässigenden Parameter bei der Auslegung und Bewertung von ortsfesten Straßenbeleuchtungsanlagen darstellt und daher zukünftig in der praktischen Anwendung zu berücksichtigen ist.

Schlagwörter: Lichtfarbe, Leuchtdichteschwelle, Detektionsschwelle, physiologische Blendung, Regen, erschwerte Sehbedingungen, Straßenbeleuchtung, Mesopik

Abstract

Current technologies in the field of illuminant developments and lighting controls allow a large variety of the luminous colour that even can be changed during the lighting system's operation. Due to these developments, the luminous colour is becoming an autonomous parameter which, especially for street lighting purposes, has hardly been taken into account and which has to be assessed.

This thesis deals with the luminous colour and investigates its effect on visual performance for a better understanding of the object detection mechanisms under street lighting conditions.

In a laboratory setup, psychophysical thresholds of 32 observers were measured. The applied research approach is closely related to practice. Thus, the objection threshold is determined at three different luminance levels typically used in street lighting conditions (0,3; 1,0; 3,0 cd/m²) and four different luminous colours (2500 K; 4000 K; 6000 K; Mint) at a total of six different target positions. Besides normal viewing conditions, the detection thresholds were also examined at impaired conditions caused by disability glare, adverse weather conditions due to rain and a combination of both (rain and glare).

The obtained results of the conducted laboratory experiments confirm that the detection threshold increases with an increase in both, luminance level and target angle. Regarding the effect of the luminous colour, a significant reduction in detection threshold could be determined for targets presented next to the foveal region. This influence is inverted at peripheral target positions. Under impaired viewing conditions caused by glare, it has been shown that the currently used method for assessing glare results in the threshold's under- or overestimation, depending on the given target position. The combination of both noise factors (glare and rain) shows that rainfall with smaller droplet diameters (drizzle) tends to a higher visual impairment resulting in higher detection thresholds.

From the results obtained in this thesis it can be concluded that the luminous colour is an important parameter in the design and assessment of stationary street lighting systems. Thus, the consciously implementation of luminous colour in future street lighting applications is recommended.

Keywords: luminous colour, luminance threshold, detection threshold, disability glare, rain, impaired viewing conditions, street lighting, mesopic vision

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	VII
Kurzfassung.....	VIII
Abstract	IX
Inhaltsverzeichnis.....	X
Kapitel 1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielstellung und Forschungsfrage	4
1.3 Überblick	5
Kapitel 2 Grundlagen zur Objektdetektion in der Straßenbeleuchtung.....	9
2.1 Das Auge	11
2.1.1 Physiologische Merkmale der Photorezeptoren.....	12
2.1.2 Adaptation und Akkommodation	15
2.2 Leuchtdichteunterschied, Kontrastempfindung und Schwellendefinition	17
2.3 Sehobjekt und Sehaufgabe	18
2.4 Störgrößen	20
2.4.1 Physiologische Blendung	20
2.4.2 Regen	22
Kapitel 3 Stand der Forschung.....	25
3.1 Studien bei normalen Sehbedingungen	25
3.2 Studien bei erschwerten Sehbedingungen.....	32
3.3 Vergleich und Diskussion der Forschungsansätze	35
3.3.1 Ergebnisse ausgewählter Studien zur Thematik	35
3.3.2 Methodiken ausgewählter Studien zur Thematik.....	38
3.3.3 Erwartungen und Forschungshypothesen	40
Kapitel 4 Methodik und Versuchsbeschreibung	45
4.1 Versuchsvariablen.....	45
4.2 Versuchsplan.....	46
4.2.1 Sehaufgabe	47
4.2.2 Versuchsumgebung	48
4.2.3 Schwellenbestimmung	49
4.3 Apparatur.....	51
4.3.1 Probandenposition und Eingabegerät.....	52
4.3.2 Projektor und Leinwand	52
4.3.3 Projektion	54
4.3.4 Blendquellen.....	57

4.3.5	Berechnungsanlage	60
4.3.6	Steuerung	62
4.4	Probandenkollektiv	64
4.5	Versuchsdurchführung.....	65
4.5.1	Versuchsreihen	65
4.5.2	Versuchsbedingungen und Testzeichen	67
4.5.3	Versuchsablauf	69
4.6	Statistische Auswertung	72
4.6.1	Vorverarbeitung der Rohdaten	72
4.6.2	Modell zur Bestimmung der Leuchtdichteschwelle	73
4.6.3	Varianzanalyse und Signifikanzprüfung.....	77
4.7	Fehler- und Messunsicherheitsbetrachtung.....	83
4.7.1	Größe und Position der Sehobjekte	83
4.7.2	Ausrichtung von Projektion und Blendquellen.....	85
4.7.3	Leuchtdichte- und Lichtfarbenmessung	86
4.7.4	Diskussion der Unsicherheiten	88
Kapitel 5	Ergebnisse und Diskussion zur Schwellenuntersuchung	93
5.1	Leuchtdichteschwelle bei normalen Sehbedingungen.....	93
5.1.1	Ergebnisdarstellung	93
5.1.2	Diskussion	97
5.2	Leuchtdichteschwelle bei Regen	105
5.2.1	Ergebnisdarstellung	105
5.2.2	Diskussion	106
5.3	Leuchtdichteschwelle bei Blendung	109
5.3.1	Ergebnisdarstellung	109
5.3.2	Diskussion	111
Kapitel 6	Schlussfolgerungen	121
6.1	Für die Praxis.....	121
6.2	Für die Wissenschaft.....	124
Anhang	129
A.1	Psychometrische Kurven und Leuchtdichteunterschiede der Testreize	129
A.2	Spektren der Adaptationsfelder	152
A.3	Probandeninformation	156
A.4	Erläuterung der Sehaufgabe	157
Abbildungsverzeichnis	160
Tabellenverzeichnis	164
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	166
Literaturverzeichnis	172

Kapitel 1 Einleitung

Dieses einleitende Kapitel beinhaltet die Erkundungsphase der vorliegenden Arbeit. Zunächst wird für die Thematik motiviert. Hierzu werden in einem kurzen Einblick Hintergründe und Bewertungsmethoden der Straßenbeleuchtungspraxis vorgestellt und das Forschungspotential für die Lichtfarbe aufgezeigt. Darauf aufbauend werden im zweiten Abschnitt die Zielstellung und Forschungsfrage dieser Arbeit formuliert sowie eine thematische Eingrenzung des Untersuchungsgegenstandes vorgenommen. Das Kapitel schließt mit einem Überblick zum strukturellen Aufbau dieser Arbeit, der die Inhalte der einzelnen Kapitel in einer kurzen Vorschau präsentiert.

1.1 Motivation

Die Anwendung von künstlichem Licht für Beleuchtungszwecke resultiert aus funktionellen oder ästhetischen Forderungen. So wird Licht funktional als Werkzeug eingesetzt, um die für eine Sehaufgabe erforderliche Sehleistung zu ermöglichen und deren Durchführung durch Bereitstellung eines adäquaten Sehkomforts zu erleichtern. Bei dieser, auch als technisches Licht bezeichneten, Anwendungsform stehen der effiziente und nachhaltige Umgang von Licht im Vordergrund. Demgegenüber steht die durch den kreativen Einsatz von Licht erzielte Ästhetik, bei der insbesondere die Lichtfarbe viele Freiheitsgrade in der Gestaltung bietet. Nach [BOYCE 2012] ist eine funktionelle Beleuchtung indifferenter Natur, die erst mit zunehmender Ästhetik zu einer guten Beleuchtung wird.

Die Straßenbeleuchtung hat eine vorwiegend funktionale Aufgabe, indem sie die Verkehrssicherheit für den Fahrzeug- und Personenverkehr in den Dunkelstunden gewährleistet und die öffentliche Ordnung und Sicherheit unterstützt. Beleuchtete Straßen und Plätze wirken sicherer und reduzieren die Angst vor nächtlichen Übergriffen. Der ästhetische Charakter der Straßenbeleuchtung begründet sich durch ihren hohen Anteil an der Stadtbeleuchtung, wodurch sie maßgeblich das nächtliche Erscheinungsbild von Städten und Gemeinden prägt und damit eine repräsentative Funktion einnimmt. Die hier genannten Aufgaben und Funktionen der Straßenbeleuchtung sind den Literaturquellen [DIN 13201-1], [DIN 5044-1], [CIE-012.2 1977], [CIE-136 2000], [HENTSCHEL 2002], [CARRARO 2008] und [ECKERT 1996] entnommen, die dem interessierten Leser für eine tiefergehende Beschreibung empfohlen werden.

Bislang werden in der Straßenbeleuchtung hauptsächlich noch konventionelle Leuchtmittel in Form von Entladungslampen eingesetzt. Das ihnen inhärente physikalische Prinzip der Lichterzeugung begrenzt den Variationsumfang der emittierten Lichtfarbe und der Lichtstromregulierung (Dimmung). Der verbleibende Variationsumfang wird zusätzlich reduziert, wenn energetische Vorgaben bei der Planung von Straßenbeleuchtungsanlagen zu erfüllen sind. Mit dem Einsatz von Leuchtmitteln auf Basis von Licht emittierenden Dioden (LED) ändert sich diese Situation grundlegend. Gegenüber konventionellen Technologien ist die LED ein elektronisches Leuchtmittel, dessen Lichtstrom in feinen Abstufungen differenziert angepasst werden kann. Zudem sind je nach verwendetem Halbleitermaterial verschiedene Lichtfarben nativ verfügbar. Zur Erreichung des für die Anwendung erforderlichen Lichtstroms werden mehrere LEDs gebündelt. Die resultierende Strahlungsleistung und deren spektrale Zusammensetzung ergeben sich additiv aus den Strahlungsleistungen und Spektren der verwendeten Primärvalenzen. Die Kombination aus differenzierter Dimmung und verschiedenfarbig emittierenden LED-Chips ermöglicht einen hohen Variationsumfang der Lichtfarbe im laufenden Betrieb. Durch die ‚Elektronifizierung‘ der Beleuchtungstechnologien ergeben sich in der Straßenbeleuchtung neue Anwendungsmöglichkeiten, bei denen die Lichtfarbe zu einem eigenständigen Parameter wird, den es zu bewerten gilt.

Aktuell erfolgt die Auslegung und Bewertung ortsfester Straßenbeleuchtungsanlagen mittels Beleuchtungsklassen. Diese sind in [DIN 13201-1] definiert und richten sich nach den zugrundeliegenden Straßengeometrien und Nutzergruppen. Für die Quantifizierung der Beleuchtungsqualität werden Gütemerkmale [DIN EN 13201-2] und Bewertungsfelder [DIN EN 13201-3] verwendet. Ein wesentliches Gütemerkmal ist die mittlere Leuchtdichte (L_m) der Fahrbahn. Sie wird in der Praxis als adaptationsbestimmende Größe verwendet. Aus ihr lässt sich unter Berücksichtigung des mittleren Leuchtdichtekoeffizienten (q_0) der Fahrbahnoberfläche die benötigte Beleuchtungsstärke (E) auf der Fahrbahn und daraus wiederum der erforderliche Lichtstrom (Φ) der zu verwendenden Leuchten errechnen. Weitere Gütemerkmale sind die Gesamt- (U_0) und Längsgleichmäßigkeit (U_l) der Leuchtdichteverteilung auf der Fahrbahn, die durch die Beleuchtung hervorgerufene Schwellenwerterhöhung (TI) sowie das Umgebungsverhältnis der Beleuchtungsstärke (SR).

Für das Lichtspektrum respektive die Lichtfarbe stellt die technische Planungspraxis bisher nur marginale Informationen bereit. Dies begründet sich vornehmlich durch die Tatsache, dass die hierfür normativ geregelten Grundlagen auf psychophysikalischen Untersuchungen beruhen, die zu einem großen Teil vor 1980 durchgeführt wurden und damit weit vor der Zeit anwendungsreifer LED-Beleuchtungssysteme und den derzeitigen technischen Möglichkeiten der Farbvariation [BOMMEL 1980], [CIE-115 2003]. Qualitativ werden die Merkmale Lichtfarbe und Farbwiedergabe (R_a) zwar erwähnt und ihnen neben einer ästhetischen Bedeutung auch ein Einfluss auf Sehleistung und Wohlbefinden beigemessen [DIN 5044-1], [DIN 13201-1], [DIN EN 12464-2], [CIE-012.2 1977], [CIE-115 2003],

[CIE-136 2000], [CIE-100 1992], [DIN EN 12464-2]. Praktisch lassen sich diese Angaben jedoch nicht definiert umsetzen, da sie einen weiten Auslegungsspielraum ermöglichen.

Obwohl der Anwendungsbereich der Straßenbeleuchtung vorwiegend den mesopischen Sehbedingungen (vgl. Abschnitt 2.1.1) zuzuordnen ist [LACHENMAYR 1995], handelt es sich bei den Gütemerkmalen um photopisch bewertete Kenngrößen, wodurch Bewertungsfehler entstehen [CIE-081 1989]. Auf dieses Problem weist auch [LEWIS 1999] hin. Er argumentiert, dass die bewusste Anwendung der Lichtfarbe in der Straßenbeleuchtung ursprünglich ökonomische und energetische Gründe hat. Seinen Ausführungen nach ist die Anwendung photopisch gewichteter Gütemerkmale unter mesopischen Bedingungen unsachgemäß und führt dazu, die Effizienzbewertung bisher eingesetzter Lichtfarben in Frage zu stellen. Die Wissenschaft ist hier bestrebt, geeignete Werkzeuge zur Bewertung von Beleuchtungsanlagen unter mesopischen Bedingungen bereitzustellen, um energetische Aufwendungen präziser zu erfassen. Ein erster Schritt hierzu erfolgte im Jahr 2010 mit der Veröffentlichung der Schrift zur mesopischen Photometrie [CIE-191 2010] durch die COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE (CIE).

Die obige Beschreibung der Gütemerkmale zeigt, dass die Lichtfarbe in der Planung und Bewertung von Straßenbeleuchtungsanlagen unterrepräsentiert ist. Zu diesem Schluss kommt auch RAYNHAM in seinem Kommentar zur Studie von [FOTIOS 2009]. Demnach wurden in den vergangenen 30 Jahren keine ganzheitlichen Studien zu dieser Thematik durchgeführt und bisherige Arbeiten auf diesem Gebiet hätten sich nur geringfügig der Wirkung des Lichtspektrums auf die Sehleistung angenommen. Bei der Kontrastbetrachtung gibt [RAYNHAM 2004] dem Farbkontrast eine ebenso hohe Berechtigung wie dem Helligkeitskontrast und fordert Beleuchtungsanlagen mit einer hohen Farbwiedergabe. Weiterhin sieht er eine steigende Bedeutung des Farbkontrastes bei der Gesichtserkennung und Objektdetektion. In diesem Zusammenhang lohnt sich ein Blick nach Großbritannien. Die dortige Norm berücksichtigt die Lichtfarbe quantitativ. So wird für Nebenstraßen eine Reduktion des Leuchtdichteniveaus auf das der niedrigeren Straßenklasse erlaubt, sofern die eingesetzten Leuchtmittel einen Mindestfarbwiedergabeindex von $R_a = 60$ aufweisen [BS 5489-1]. Auch wenn die Anwendung des Farbwiedergabewertes unter mesopischen Bedingungen kritisch zu hinterfragen ist, zeigt diese Regelung das Bestreben, den Einfluss des Lichtspektrums in der Praxis zu berücksichtigen.

Hinsichtlich der Sehbedingungen sind zunehmend auch die, durch Störgrößen hervorgerufenen, erschwerten Sehbedingungen zu berücksichtigen. Die eigene Erfahrung lehrt, dass insbesondere die Einflussgrößen physiologische Blendung und widrige Wetterbedingungen zu einer Beeinträchtigung der Sehleistung im nächtlichen Straßenverkehr führen. Die Vermeidung von Blendung und die Berücksichtigung von Wetterbedingungen werden auch in der von [VIKARI 2012] durchgeführten Umfrage als Schwerpunktthemen genannt. Die Mechanismen der physiologischen Blendung sind grundlegend

bekannt und werden in der Straßenbeleuchtungspraxis durch das Modell der Schwellenwerterhöhung angewandt. Hingegen sind die durch widrige Witterungsbedingungen wie Regen und Nebel hervorgerufenen Beeinträchtigungen der Sehaufgabe bislang wenig verstanden [CIE-100 1992].

Bedingt durch die technischen Fortschritte in den Bereichen der Lampen-, Leuchten- und Steuerungstechnologie, das damit aufkommende Interesse an informationsverarbeitenden adaptiven Beleuchtungssystemen, politische Beschlüsse zur energetischen Effizienzsteigerung sowie die sanierungsbedürftigen Zustände einer Vielzahl von Beleuchtungsanlagen befindet sich die Straßenbeleuchtungspraxis vor tiefgreifenden Veränderungen. Hieraus ergeben sich ausreichende Anreize, neue Erkenntnisse über die Anwendung der Lichtfarbe auf diesem Gebiet zu erarbeiten, um deren Einfluss auf die visuelle Wahrnehmung, insbesondere hinsichtlich sicherheitsrelevanter Kriterien, zu untersuchen sowie Aussagen über energetische Belange abzuleiten.

1.2 Zielstellung und Forschungsfrage

Diese Arbeit versteht sich als ein Beitrag zur angewandten Forschung in der Straßenbeleuchtung mit dem Ziel, neue Erkenntnisse zu dem Einfluss der Lichtfarbe auf die Objektdetektion unter Berücksichtigung praxisnaher Merkmale zu gewinnen. Die Ergebnisse sollen dazu beitragen, die Beleuchtungsanlagen im öffentlichen Raum zukünftig effizienter zu gestalten.

Mit der Objektdetektion wird eine leistungsbasierte Sehaufgabe gewählt, die dem funktionellen Charakter der Straßenbeleuchtung gerecht wird. Die Untersuchung soll bei verschiedenen Leuchtdichteniveaus sowie (nah-)fovealen (bis $\pm 2^\circ$ zur Sehachse) und peripheren Objektpositionen erfolgen. Zusätzlich sollen neben normalen, d. h. ungestörten, Sehbedingungen auch die in der Straßenbeleuchtung typischen Störgrößen Regen und Blendung, welche erschwerte Sehbedingungen hervorrufen, untersucht werden.

Im Sinne einer wissenschaftlichen Vorgehensweise ist das Erkenntnisinteresse in einer Fragestellung, der Forschungsfrage, zu formulieren [FRANCK 2009]:

„Welchen Einfluss hat die Lichtfarbe der ortsfesten Straßenbeleuchtung auf die (nah-)foveale und periphere Objektdetektion bei verschiedenen Adaptationsniveaus im mesopischen Bereich unter normalen und, durch Regen und Blendung hervorgerufenen, erschwerten Sehbedingungen?“

Die Forschungsfrage bildet die Grundlage der durchgeführten Arbeitsschritte und trägt hierdurch die gesamte Arbeit. Mit ihrer Beantwortung soll die Aufgabenstellung dieser Arbeit restlos erfüllt und die hierdurch beschriebene Forschungslücke geschlossen werden.

Zur Präzisierung der Fragestellung wird die nachfolgende Eingrenzung der Thematik vorgenommen:

- Es wird ausschließlich die Wirkung ortsfester Straßenbeleuchtung auf die Objektdetektion untersucht. Einflüsse von Kraftfahrzeugbeleuchtung sowie weiteren Lichtquellen wie Signal- und Ampelanlagen, beleuchtete Schaufenster, Medienfassaden, LED-Wände und Architekturbeleuchtung, allein und im Zusammenspiel mit der ortsfesten Beleuchtung, werden nicht berücksichtigt.
- Es werden ausschließlich statische Versuchsszenarien betrachtet, d. h. weder die Position der Versuchsperson noch die lichttechnischen Parameter der Beleuchtungsanlage ändern sich im Verlauf einer Versuchsreihe. Die Sehobjekte werden an vordefinierten Positionen mit konstanten Darbietungszeiten gezeigt.
- Es werden keine Untersuchungen zu Farbwiedergabeeigenschaften durchgeführt. Begründet wird dies durch das Ziel der Arbeit, den funktionalen Charakter der Straßenbeleuchtung in Form der Objektdetektion zu untersuchen und nicht eine hohe und natürliche Wiedergabe von Körperfarben zu erreichen.
- Die als praxisnahe Störgröße zu untersuchende Blendwirkung berücksichtigt ausschließlich physiologische und keine psychologischen Aspekte. Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit ist die Objektdetektion, welche ein Bewertungsmaß für die Sehleistung darstellt. Psychologische Blendwirkungen beeinträchtigen primär den Sehkomfort.
- Die Untersuchungen werden in einer Laborumgebung unter Berücksichtigung eines hohen Praxisbezugs durchgeführt.
- Die Untersuchungen erfolgen per Definition unter mesopischen Bedingungen.
- An den Untersuchungen beteiligt sich ein altersbeschränktes, normalsichtiges Versuchspersonenkollektiv.

1.3 Überblick

In diesem einleitenden Kapitel 1 wurde für das Thema motiviert, indem die Anwendung und Bewertung von Straßenbeleuchtungsanlagen sowie technische Neuerungen aufgezeigt wurden. Darauf aufbauend wurde die Zielstellung dieser Arbeit abgeleitet und in einer Forschungsfrage formuliert. Zur Präzisierung des Untersuchungsgegenstandes wurde eine thematische Eingrenzung vorgenommen.

In Kapitel 2 werden die für den weiteren Verlauf der Arbeit benötigten Grundlagen zur Objektdetektion in der Straßenbeleuchtung gegeben. Hierzu wird einführend das Test-szenario eines Feldversuchs vorgestellt, anhand dessen die Sehaufgabe der Objektdetektion exemplarisch beschrieben wird. Die Durchführung der Sehaufgabe besteht aus einem Wechselspiel zwischen dem Beobachter und seiner Umgebung, auf das in den einzelnen Teilen dieses Kapitels eingegangen wird. Zu Beginn werden die elementaren

physiologischen Mechanismen des menschlichen Auges erläutert. Im zweiten Abschnitt werden die zur Operationalisierung der Objektdetektion verwendeten Begriffe und Definitionen eingeführt. Darauf folgt eine ausführliche Beschreibung des Sehobjekts und der Sehaufgabe. Auf die Objektdetektion hinderlich wirkende Einflussgrößen, sogenannte Störgrößen, werden im letzten Abschnitt vorgestellt.

Kapitel 3 beinhaltet mit dem Stand der Forschung das Ergebnis zur fachlichen Vertiefung der Thematik. In den ersten beiden Abschnitten werden Forschungsarbeiten vorgestellt, die im Rahmen der Literaturrecherche ausgewählt wurden und die den gegenwärtigen Kenntnisstand reflektieren. Im letzten Abschnitt werden die zuvor präsentierten Forschungsansätze bezüglich ihrer Ergebnisse und Methodiken miteinander verglichen und diskutiert. Aus der Diskussion werden die Erwartungen an die Studienvariablen dieser Arbeit abgeleitet und in Form von Forschungshypothesen formuliert.

Das Kapitel 4 bildet den Kern dieser Arbeit. Es ist in sieben Abschnitte strukturiert und enthält die zur Beantwortung der Forschungsfrage erarbeitete Methodik sowie die Beschreibung der Versuche. Es werden zunächst die Versuchsvariablen definiert. Darauf folgt im zweiten Abschnitt die Aufstellung des Versuchsplans, der das beabsichtigte Vorgehen der empirischen Untersuchung beschreibt und die Anforderungen an den Versuchsaufbau festlegt. Die technische Umsetzung der Versuchsausrüstung und deren messtechnische Validierung sind im dritten Abschnitt enthalten. Im vierten Teil werden die Eignungsprüfung und die Zusammensetzung des an den Untersuchungen beteiligten Versuchspersonenkollektivs erläutert. Der fünfte Abschnitt gibt eine detaillierte Beschreibung der Versuchsdurchführung. Es folgen die Methoden zur statistischen Auswertung der im Versuch erhobenen Daten sowie die Einführung eines Modells, mit dem die Leuchtdichteschwellen berechnet werden. Das Kapitel schließt mit einer Fehler- und Messunsicherheitsbetrachtung, anhand derer die Genauigkeit der Versuchsausrüstung und der dargebotenen Versuchsreize abgeschätzt werden.

In Kapitel 5 werden die in dieser Arbeit empirisch bestimmten Detektionsschwellen präsentiert und diskutiert. Hierzu ist das Kapitel in drei Abschnitte gegliedert. Zunächst werden die normalen Sehbedingungen betrachtet. Die übrigen Abschnitte befassen sich mit erschwerten Sehbedingungen. Der Einfluss von Regen auf die Detektionsschwelle ist Bestandteil des zweiten Abschnitts. Blendung ohne und in Kombination mit Regen ist im letzten Abschnitt enthalten.

Das abschließende Kapitel 6 enthält die Schlussfolgerungen dieser Arbeit. Im ersten Teil werden die wesentlichen Ergebnisse zusammengefasst und deren Praxisrelevanz beschrieben. Die wissenschaftlich orientierten Schlussfolgerungen sind im zweiten Abschnitt enthalten. Hierin wird das methodische Vorgehen der Arbeit reflektiert, um Anregungen zu Verbesserungen und Vorschläge für weiterführende Studien zu geben.

Kapitel 2 Grundlagen zur Objektdetektion in der Straßenbeleuchtung

Abbildung 2-1 zeigt ein Testszenario zur Bestimmung der Objektdetektion im realen Umfeld, das im Rahmen einer Feldstudie auf einem Straßenzug im Industriegebiet von Ilmenau durchgeführt wurde. Die ortsfeste Beleuchtung ist rechtsseitig mit insgesamt fünf Lichtpunkten (LP) ausgeführt. Die Lichtpunkthöhe (LPH) beträgt 8 m, der Lichtpunktabstand (LPA) 30 m. Die Lichtaustrittsfläche jeder Leuchte beträgt 1440 cm². Das mit der Beleuchtungsanlage normativ zu erzielende Leuchtdichteniveau liegt im Größenbereich mesopischer Sehbedingungen (vgl. Abschnitt 2.1.1).



Abbildung 2-1: Testszenario zur Objektdetektion unter praxisnahen Bedingungen auf einem Straßenzug im Industriegebiet von Ilmenau [Foto: I. HERZOG, Ilmenau].

Die Sehaufgabe des Beobachters besteht in der Erkennung (Detektion) von Sehobjekten, die auf der Fahrbahn innerhalb eines Bewertungsfeldes positioniert werden. Dieses Feld beginnt in einer Entfernung von 60 m zum Beobachter und seine Länge entspricht dem Lichtpunktabstand der zu bewertenden Anlage [DIN EN 13201-3]. Im vorliegenden Testszenario liegt das Bewertungsfeld zwischen dem zweiten und dritten Lichtpunkt. Seine Eckpunkte werden durch die am linken und rechten Fahrbahnrand positionierten Markierungen gekennzeichnet. Innerhalb des Bewertungsfeldes befinden sich neun quadratische Sehobjekte mit verschiedenen Reflexionsgraden.

Der in diesem Beispiel einfach erscheinenden Sehaufgabe der Objektdetektion liegt nach [ECKERT 1993] ein komplexer Prozess auf der Ebene des Mensch-Maschine-Umwelt-Systems zugrunde, der sich auf subjektive und objektive Einflussfaktoren zurückführen lässt.

Das Auge übernimmt in diesem Prozess eine tragende Funktion, denn aufgrund seiner Fähigkeit der Wandlung elektromagnetischer Strahlung in neuronale Impulse bildet es die Schnittstelle zwischen dem realen Umfeld (distaler Reiz) und der, durch die visuelle Abbildung auf der Retina erzeugten, Anregung der Photorezeptoren (proximaler Reiz). Seine physiologischen Merkmale sowie grundlegenden Anpassungsvorgänge an die Umgebungsbedingungen sind Bestandteil von Abschnitt 2.1.

Für die Erkennbarkeit der gezeigten Objekte müssen sich diese von ihrer unmittelbaren Umgebung für den Menschen visuell wahrnehmbar unterscheiden. Hierzu verfügt der menschliche Sehapparat über elementare Sehfunktionen, die auf verschiedenen Verarbeitungstiefen im Wahrnehmungsprozess einsetzen und der perzeptualen Strukturierung der Informationen dienen [SCHÖBER 1957]. Eine wesentliche Unterschiedsempfindung ist die Hellempfindung, die durch die direkte Verknüpfung mit dem proximalen Reiz das subjektive Maß für die Menge des auf der Retina auftreffenden Lichtes ist; folglich ist sie als Eingangsgröße für die Adaptation und alle weiteren Sehfunktionen zu verstehen [VÖLKER 2006]. Der für die Hellempfindung erforderliche Leuchtdichteunterschied zur Abgrenzung eines Objektes von seiner Umgebung wird in Abschnitt 2.2 beschrieben und durch die Kontrastempfindung und die Schwellendefinition ergänzt.

Das Sehobjekt ist die Zielgröße der Sehaufgabe und hat durch seine Charakteristika (u. a. Größe, Form, Darbietungszeit) einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Detektionsleistung [ECKERT 1993]. In Abschnitt 2.3 wird auf das in der Straßenbeleuchtungspraxis typischerweise verwendete Sehobjekt eingegangen und die damit verbundene Sehaufgabe beschrieben.

Die Sehaufgabe kann durch zusätzliche Einflüsse beeinträchtigt werden, wodurch die Erkennbarkeit des Sehobjekts reduziert wird. Solche Einflüsse werden nachfolgend als Störgrößen bezeichnet. In der Straßenbeleuchtungspraxis typische und nicht selten auftretende Störgrößen sind Blendung und Regenereignisse. Erstgenannte ist dabei direkt mit der Auslegung der ortsfesten Straßenbeleuchtungsanlage verknüpft und lässt sich in Abbildung 2-1 an den erkennbaren Überstrahlungen um die Lichtpunkte erahnen. In Abschnitt 2.4 werden die genannten Störgrößen ausführlicher beschrieben und auf die durch sie hervorgerufenen Auswirkungen eingegangen.

Dieses Kapitel hat zum Ziel, die für den weiteren Verlauf dieser Arbeit benötigten Grundlagen zur Objektdetektion in der Straßenbeleuchtung zu geben. Die hieraus entstehenden Kenntnisse fließen sowohl in die Aufarbeitung des Forschungsstandes (vgl. Kapitel 3) sowie in das methodische Vorgehen (vgl. Kapitel 4) ein.

2.1 Das Auge

Die elektromagnetische Strahlung tritt durch die Pupille in das Auge ein und durchquert anschließend den Linsenapparat sowie den Glaskörper, bevor sie auf der Retina auftrifft (Abbildung 2-2). Die foveale Blickrichtung wird durch eine zentrale Sehachse beschrieben, die durch den gelben Fleck (Macula Lutea) verläuft.

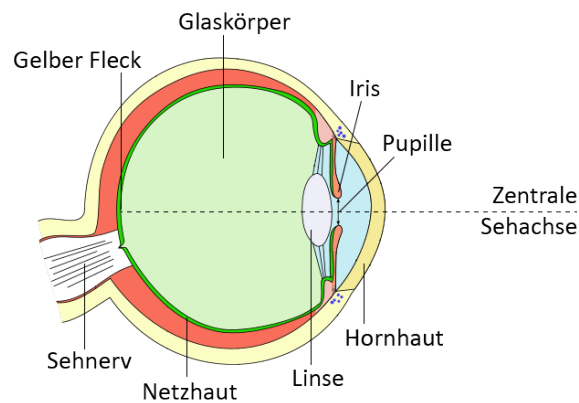


Abbildung 2-2: Horizontalschnitt des Auges [Grafik nach: TALOS und JAKOV, GFDL¹].

Das visuelle System verfügt über etwa 126 Millionen Photorezeptoren in Form von Stäbchen (120 Millionen) und Zapfen (6 Millionen). Die Signaltransduktion erfolgt in den Außensegmenten der Photorezeptoren, die sich aufgrund des inversen Aufbaus der Netzhaut (Retina) in deren tieferen Schichten befinden (Abbildung 2-3).

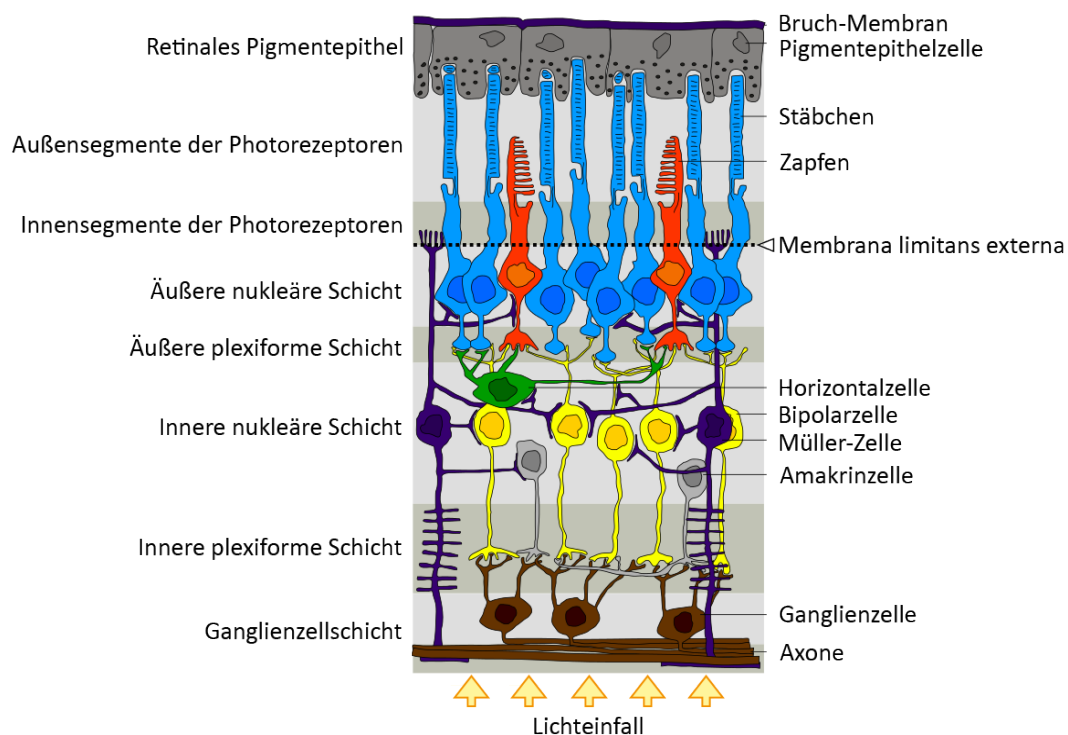


Abbildung 2-3: Retinaler Aufbau des Auges [Grafik nach: P. HARTMANN, GFDL].

¹ GFDL: GNU Free Documentation License.

Aus dem in Abbildung 2-3 gezeigten retinalen Aufbau ist zu entnehmen, dass die Ausgänge der Photorezeptoren auf verschiedenen Zellebenen miteinander verschaltet sind; hierdurch konvergieren sie auf ungefähr 1 Million Ganglienzellen, deren Axone gebündelt den Sehnerv (vgl. Abbildung 2-2) bilden. Die mit einer Ganglienzelle verbundenen Photorezeptoren und Bipolarzellen bilden ein rezeptives Feld, dessen Reizung eine Veränderung der neuronalen Entladungsrate der Ganglienzelle bewirkt [GOLDSTEIN 2002]. Im nahfovealen Bereich konvergiert nahezu jeder einzelne Rezeptor mit einer Ganglienzelle, wodurch sich die hohe Ortsauflösung dieses Retinagebiets ergibt. Mit zunehmender Exzentrizität erhöht sich jedoch die Größe der rezeptiven Felder, wodurch die Ortsauflösung reduziert und die Hellempfindlichkeit gesteigert wird.

Die Photorezeptoren unterscheiden sich grundlegend in ihrer spektralen Empfindlichkeit und ihrer räumlichen Verteilung innerhalb der Retina. Im Folgenden wird auf diese beiden physiologischen Charakteristika eingegangen. Anschließend werden mit der Adaptation und der Akkommodation die Anpassungsleistungen des Sehapparates erläutert. Für eine tiefergehende Beschreibung des Auges werden die Werke von [SCHÖBER 1957] und [SCHÖBER 1954] sowie [GOLDSTEIN 2002], [BERKE 1999] und [KOLB 2003] empfohlen.

2.1.1 Physiologische Merkmale der Photorezeptoren

Die spektralen Empfindlichkeiten der Photorezeptoren lassen sich durch Übertragungsfunktionen beschreiben, anhand derer die radiometrischen Größen bewertet und dadurch in visuelle Wahrnehmungsgrößen überführt werden [DIN 5031-2], [CIE-041 1994]. Die spektrale Hellempfindlichkeit der Stäbchen wird durch die $v'_{10^\circ}(\lambda)$ -Kurve beschrieben (Abbildung 2-4, blau), deren Maximum bei einer Wellenlänge von $\lambda_{\text{St,max}} = 507 \text{ nm}$ liegt [CIE-018.2 1983]. Sie bezieht sich auf ein Gesichtsfeld der Größe 10° .

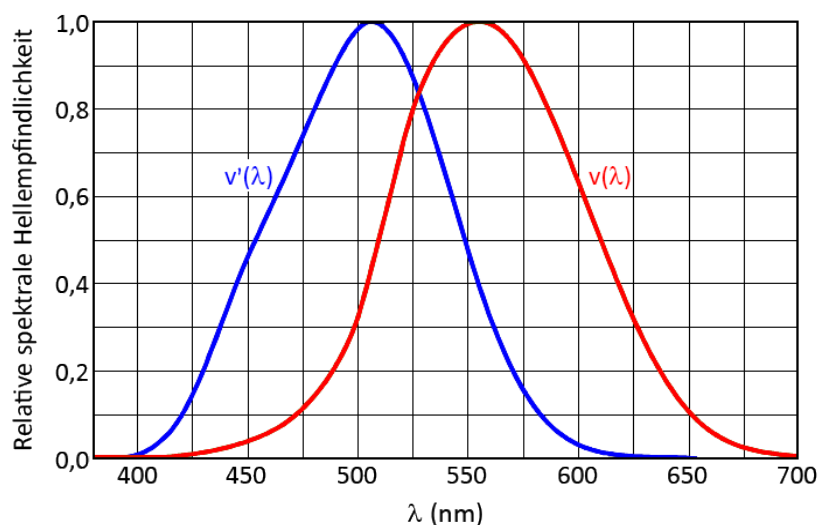


Abbildung 2-4: Relative spektrale Hellempfindlichkeitskurven der Stäbchen (blau) und Zapfen (rot) [Grafik nach: CH. SCHIERZ, Ilmenau].

Von den Zapfen gibt es drei verschiedene Typen, deren maximale Empfindlichkeiten bei $\lambda_{S,\max} \approx 421 \text{ nm}$ (S-Zapfen), $\lambda_{M,\max} \approx 530 \text{ nm}$ (M-Zapfen) und $\lambda_{L,\max} \approx 559 \text{ nm}$ (L-Zapfen) liegen [STOCKMAN 1999], [STOCKMAN 2000]. Ihre relativen spektralen Empfindlichkeiten nach [Vos 1978] sind in Abbildung 2-5 gezeigt. Die kombinierte Empfindlichkeit der drei Zapfentypen ergibt sich aus der Gewichtung der Zapfeneingänge im Verhältnis zu deren relativen Dichten in der Fovea und entspricht der spektralen Hellempfindlichkeit des photopisch adaptierten Auges, beschrieben durch die $v_2(\lambda)$ -Kurve (Abbildung 2-4, rot). Ihr Maximum liegt bei $\lambda_{Za,\max} = 555 \text{ nm}$ [CIE-018.2 1983].

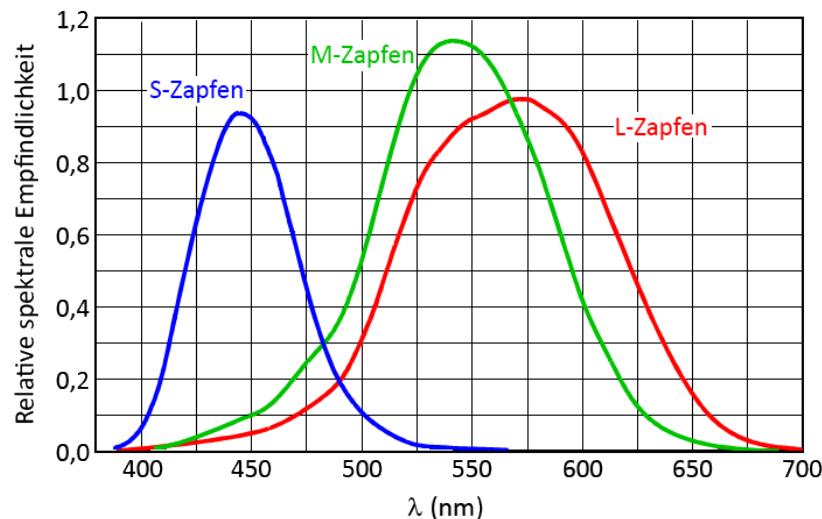


Abbildung 2-5: Relative spektrale Empfindlichkeitskurven der S- (blau), M- (grün) und L-Zapfen (rot) [Grafik nach: CH. SCHIERZ, Ilmenau].

Die Beteiligung beider Rezeptorarten am Sehprozess wird durch das vorherrschende Leuchtdichteniveau im Gesichtsfeld bestimmt. Das Sehen mit den Stäbchen (skotopisches Sehen) erfolgt bei niedrigen, das Zapfensehen (photopisches Sehen) bei hohen Leuchtdichten. Die Grenzen dieser Sehbereiche sind fließend und werden durch photopisch bewertete Leuchtdichten definiert, wobei in der Literatur verschiedene Werte zu finden sind [BAER 2006], [LACHENMAYR 1995], [ECKERT 1993], [DIN 5031-2]. Für das skotopische Sehen ergibt sich ein oberer Grenzbereich von $L = 10^{-5} \dots 10^{-2} \text{ cd/m}^2$. Der untere Bereich des photopischen Sehens lässt sich mit $L = 10^{-2} \dots 10^2 \text{ cd/m}^2$ beziffern.

In dem durch die Mesopik beschriebenen Übergangsbereich zwischen photopischem und skotopischem Sehen sind beide Rezeptorarten am Sehprozess beteiligt [CIE-017.4 1987]. Die hierbei einsetzende Verschiebung zwischen der photopischen und skotopischen Hellempfindlichkeitskurve wird als PURKINJE-Verschiebung bezeichnet. Im mesopischen Bereich lässt sich die spektrale Hellempfindlichkeit nach derzeitigem Kenntnisstand nicht durch eine einzelne Wichtungsfunktion abbilden. Vielmehr wird eine Funktionsschar benötigt, die das entstehende Mischverhältnis der spektralen Stäbchen- und Zapfenempfindlichkeiten in Abhängigkeit der Adaptationsleuchtdichte modelliert und damit den stetigen Übergang zwischen den Maxima dieser beiden spektralen Empfindlichkeiten beschreibt. Folglich sind bei mesopischen Sehprozessen vier

Eingangsgrößen (Stäbchen sowie S-, M-, L-Zapfen) bei stetig variierenden Wichtungsfunktionen zu verarbeiten. Dieser physiologische Umstand verdeutlicht die Komplexität bei der quantitativen Erfassung mesopischer Sehvorgänge.

Ein Ansatz zur quantitativen Beschreibung der Hellempfindung bei mesopischen Bedingungen ist das Verhältnis zwischen skotopisch und photopisch bewerteter Strahlung (s/p) [CIE-191 2010], [BOMMEL 2015]. Es beschreibt den relativen Beitrag der Stäbchen und Zapfen zur visuellen Wahrnehmung. Werte von $s/p < 1$ bedeuten, dass die Lichtsituation vorwiegend langwellige Spektralanteile enthält, wodurch die Stäbchen weniger stark angeregt werden. Bei einem Verhältnis $s/p > 1$ liegt die spektrale Energie vornehmlich im kurzwelligen Bereich des Lichtspektrums, so dass in diesem Fall die Stäbchen einen höheren Beitrag zur Wahrnehmung leisten. Mit diesem Ansatz wird lediglich die Spektralverteilung der betrachteten Lichtsituation bewertet. Es werden keine Aussagen über die Sehprozesse unter mesopischen Bedingungen getroffen. Dennoch scheint dieses Bewertungsmaß für die praktische Anwendung geeignet, da es mit etablierter Lichtmesstechnik einfach bestimmt werden kann. Es wird daher im weiteren Verlauf dieser Arbeit zur Quantifizierung der zu untersuchenden Lichtsituationen Anwendung finden.

Die Verteilung der Stäbchen und Zapfen ist nicht gleichförmig. Abbildung 2-6 zeigt die Dichte der Zapfen (rot) und Stäbchen (blau) in Abhängigkeit des Blickwinkels (θ), der die Exzentrizität zur zentralen Sehachse (vgl. Abbildung 2-2) angibt. Die dargestellte Zapfendichte setzt sich aus den Häufigkeitsverteilungen der drei Zapfentypen zusammen, die nach [BERKE 1999] ein Verhältnis von M : L : S = 55 : 33 : 12 % aufweisen. Der grau markierte Bereich, der etwa bei $\theta \approx 15^\circ \dots 18^\circ$ nasal liegt, entspricht der Position der Papille (Blinder Fleck), an der keine Photorezeptoren vorhanden sind [AUGUSTIN 2001].

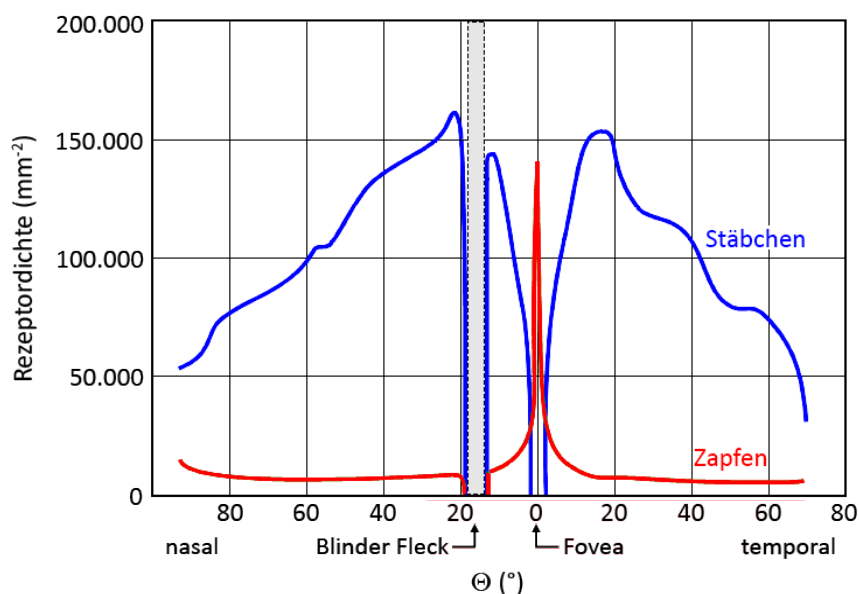


Abbildung 2-6: Örtliche Verteilung von Stäbchen (blau) und Zapfen (rot) auf der Retina [Grafik nach: CH. SCHIERZ, Ilmenau].

Die höchste Zapfendichte befindet sich im unmittelbaren Umfeld der zentralen Sehachse ($\theta = 0^\circ$). Dieser, als Sehgrube (Fovea Centralis) bezeichnete Netzhautbereich, umfasst einen Durchmesser von $d \approx 1,5$ mm und ist frei von Stäbchen [BERKE 1999]. Im Inneren der Sehgrube liegt die Foveola, ein kleiner Netzhautbereich mit einem Sehwinkel von etwa $1,25^\circ$ ($d \approx 0,35$ mm), der ausschließlich M- und L-Zapfen enthält [BERKE 1999]. Die S-Zapfen erreichen ihre höchste Dichte in einem Abstand von etwa 0,1 – 0,3 mm zur zentralen Sehachse [CURCIO 1990]. Mit ansteigender Exzentrizität sinkt die Zapfendichte zunächst deutlich und erreicht näherungsweise ein Plateau bei einem Exzentrizitätswinkel von $\theta \approx 11^\circ$. Dabei ist die periphere Verteilung der Zapfendichte asymmetrisch. Bei gleicher Exzentrizität ist die Zapfendichte in der nasalen gegenüber der temporalen Retinahälfte um etwa 40 – 45 % höher [CURCIO 1990]. Zudem zeichnet sich zum nasal gelegenen Epithelübergang (Ora Serrata) eine leicht erhöhte Zapfendichte ab.

Die Stäbchen befinden sich außerhalb der Sehgrube. Ihre Dichte steigt mit zunehmender Exzentrizität und erreicht ihr Maximum im mittelperipheren Bereich bei etwa $\theta \approx 20^\circ$ (18° temporal, 23° nasal), bevor sie dann allmählich wieder abnimmt [AUGUSTIN 2001].

Aus der örtlichen Rezeptorverteilung wird deutlich, dass mit zunehmender Gesichtsfeldgröße die kumulierte Quantität der Stäbchen gegenüber den Zapfen steigt. Das Verhältnis der Anzahl von Stäbchen (St) zu Zapfen (Za) beträgt nach [KOKOSCHKA 1972] etwa $n_{St/Za} = 0,5$ für ein Gesichtsfeld von $\theta = 3^\circ$. Dieses erhöht sich auf $n_{St/Za} = 2,4$ ($\theta = 9,5^\circ$) und $n_{St/Za} = 13$ ($\theta = 26^\circ$). Hieraus geht hervor, dass die visuelle Wahrnehmung im nahfovealen Bereich (Exzentrizität bis $\theta = \pm 2^\circ$) vornehmlich durch das Zapfensehen getragen wird. Unter Berücksichtigung der Zapfenhäufigkeitsverteilung, nach der die M-Zapfen am stärksten vertreten sind, ist zu erwarten, dass eine Beleuchtungssituation mit einer Strahlungsleistung im Bereich der maximalen Empfindlichkeit der M-Zapfen zu einem, gegenüber den anderen Zapfentypen, höheren Aktivierungspotential und damit zu einer höheren Detektionswahrscheinlichkeit führt. Hingegen ist beim peripheren Sehen anzunehmen, dass Spektralverteilungen mit einem höheren Anteil kurzwelliger Strahlung des sichtbaren Spektrums zu einer stärkeren Anregung der Stäbchen und damit zu einer Steigerung der visuellen Wahrnehmungsempfindlichkeit führen.

2.1.2 Adaptation und Akkommodation

Das visuelle System befindet sich in einem stetigen Regelkreis, um sich kontinuierlich den vorherrschenden Umgebungsbedingungen anzupassen. Hierzu bedient es sich der physiologischen Mechanismen der Adaptation und der Akkommodation.

Die Adaptation beschreibt die Anpassung des Auges an die einfallende Strahlungsleistung. Nach [SCHÖBER 1954] stehen hierfür mit der Regulierung der Pupillenweite, dem Beteiligungsverhältnis der Photorezeptoren, der Anpassung der Sehfärbstoffkonzentrationen innerhalb der Rezeptoren (chemische Adaptation) sowie die durch neuronale Verschaltungsmechanismen bewirkte Größenänderung der rezeptiven Felder (neuronale

Adaptation) insgesamt vier Stellgrößen zur Verfügung. Eingangsgröße des Adaptationsprozesses ist die auf der Netzhaut einfallende Strahlungsleistung, die an jedem Auftreffort auf der Retina zu einer Anregung des dortigen Rezeptors führt und mit seiner inhärenten Übertragungsfunktion bewertet wird. Die Ausgangssignale der Rezeptoren führen in erster Instanz zu einer Hellempfindung. Bleibt das vorherrschende Beleuchtungsniveau konstant, stabilisiert sich der Adaptationsprozess.

Durch das annähernd proportionale Verhältnis zwischen retinaler Beleuchtungsstärke und der Leuchtdichte im Gesichtsfeld kann der Adaptationszustand auf eine Leuchtdichtemessung zurückgeführt werden. Die Adaptationsleuchtdichte (L_{adapt}) entspricht der mittleren Leuchtdichte des adaptationsbestimmenden Gesichtsfeldes, das symmetrisch zur Sehachse liegt und einen Sehwinkel von 20° ($\Theta = 10^\circ$) umfasst [BAER 2006].

Die Dauer des Adaptationsvorgangs ist abhängig von der Größe und Richtung des Unterschiedes zwischen dem aktuellen und dem vorausgehenden vorherrschenden Leuchtdichteniveau sowie dem vorausgehenden Adaptationszustand. Die Dunkeladaptation verläuft wesentlich langsamer als die Helladaptation. Abbildung 2-7 zeigt den Verlauf der Leuchtdichteunterschiedsschwelle (ΔL_{th}) gegenüber der Adaptationszeit (t_{adapt}) bei Dunkeladaptation. Zu Beginn dieses Prozesses erfolgt die Empfindlichkeitsanpassung der Zapfen, die nach etwa 8–10 Minuten näherungsweise ihre Sättigung erreichen. Der nicht stetige Übergang (KOHLEAUSCH-Knick) wird durch den Wechsel vom Zapfen- zum Stäbchensehen verursacht. [SCHÖBER 1954], [HENTSCHEL 2002]

Der Verlauf der Dunkeladaptation ist bei der Versuchsplanung in Abhängigkeit der noch zu definierenden Sehaufgabe (vgl. Abschnitt 4.2.1) zu berücksichtigen, um eine ausreichende Stabilisierung des Adaptationsniveaus der Versuchspersonen zu erreichen.

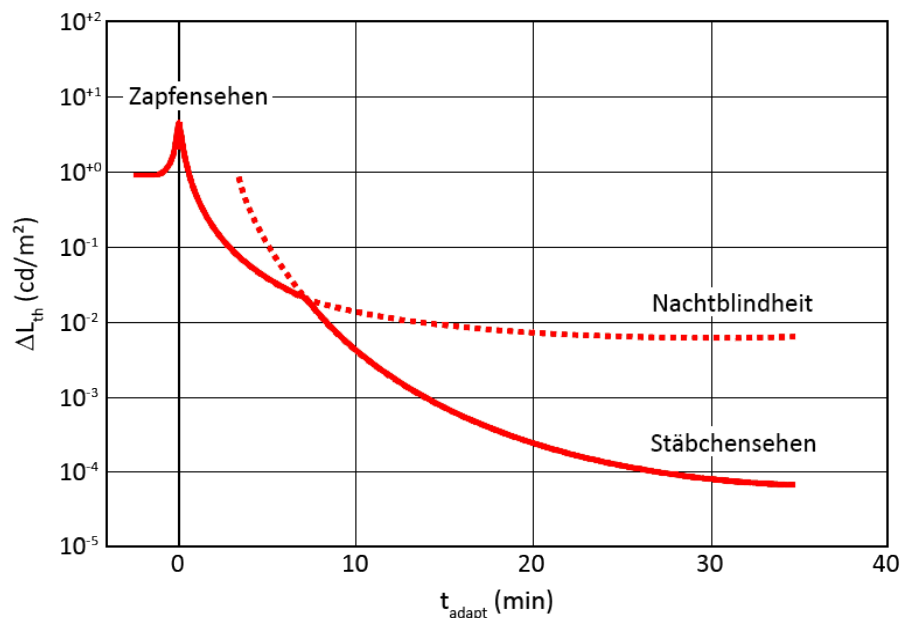


Abbildung 2-7: Zeitlicher Verlauf der Leuchtdichteunterschiedsschwelle (ΔL_{th}) bei Dunkeladaptation [Grafik nach: CH. SCHIERZ, Ilmenau].

Die Akkommodation beschreibt die, durch eine Verformung der Augenlinse erreichte, Anpassung des Auges an unterschiedliche Gegenstandsweiten und ermöglicht hierdurch die scharfe Abbildung von Objekten auf der Retina [SCHÖBER 1954], [AUGUSTIN 2001]. Bei einer emmetropen Person liegt die maximal mögliche Gegenstandsweite (Fernpunkt) im Unendlichen (0 dpt). Die minimale Gegenstandsweite (Nahpunkt) ist aufgrund der im Laufe des Lebens nachlassenden Elastizität der Augenlinse stark altersabhängig. Der durch den Nah- und Fernpunkt eingegrenzte Bereich wird als Akkommodationsbreite bezeichnet. Mit abnehmender Leuchtdichte rückt der Fernpunkt näher an das Auge heran, wodurch es kurzsichtiger wird (Nachtmyopie), und der Nahpunkt weiter vom Auge weg (Nachtpresbyopie) [ECKERT 1993]. Es kommt zu einer Reduktion der Akkommodationsbreite. Nach den Ausführungen von [LINDNER 1976] verlagert sich der Fernpunkt bei einem Adaptationsniveau von $L_{\text{adapt}} = 1,0 \text{ cd/m}^2$ um etwa 0,5 dpt in den Nahbereich, was einer Entfernung von ungefähr 2 m zum Auge entspricht. Demnach findet die einleitend erwähnte und im Abschnitt 2.3 detaillierter beschriebene Sehaufgabe jenseits des Fernpunktes außerhalb der Akkommodationsbreite statt.

Die zur Einstellung der Akkommodation benötigte Dauer ist von der Höhe des Akkommodationsanreizes abhängig. Bei guten Beleuchtungsverhältnissen werden für Objekte mit hohen Kontrasten Zeiten von 300 – 400 ms angegeben [LACHENMAYR 2006]. Bei geringen Akkommodationsreizen, d. h. bei geringeren Objektkontrasten sowie niedrigeren Adaptationsniveaus, verläuft der Akkommodationsvorgang ungenauer und langsamer. Für die Beleuchtungsverhältnisse im Straßenverkehr nennt [LACHENMAYR 2006] Einstellzeiten der Akkommodation in der Größenordnung von Sekunden.

Die bei niedrigen Umgebungsleuchtdichten verkürzte Lage des Fernpunktes sowie die verlangsamte Einstelldauer des Akkommodationsvorgangs sind bei der Versuchsplanung zu berücksichtigen, um einerseits praxisnahe Beobachtungsbedingungen zu erzielen und, andererseits, eine für alle im Versuch dargebotenen Sehobjekte vergleichbare Akkommodationseinstellung zu gewährleisten.

2.2 Leuchtdichteunterschied, Kontrastempfindung und Schwellendefinition

Der absolute Leuchtdichteunterschied (ΔL) ergibt sich nach Gleichung 2-1 aus der Differenz zwischen der Leuchtdichte des zu betrachtenden Objektes (L_{Obj}) und der Leuchtdichte seiner unmittelbaren Umgebung (L_U).

$$\Delta L = L_{\text{Obj}} - L_U \quad \text{Gleichung 2-1}$$

Die Kontrastempfindung beschreibt die Fähigkeit, relative Leuchtdichtedifferenzen zu unterscheiden. Nach [ECKERT 1993] ist sie die relevanteste Empfindungsart für die Objektdetektion und damit von grundlegender Bedeutung für die weitere Betrachtung.

Für homogene Umfelder und einfache Sehobjekte empfiehlt die [CIE-095 1992] die Anwendung der Kontrastberechnung nach Gleichung 2-2.

Hierbei ergibt sich der Kontrast (K) aus dem Verhältnis zwischen Leuchtdichteunterschied (ΔL) und vorherrschendem Adaptationsniveau, beschrieben durch die Adaptationsleuchtdichte (L_{adapt}).

$$K = \frac{\Delta L}{L_{\text{adapt}}} = \frac{L_{\text{Obj}} - L_{\text{U}}}{L_{\text{adapt}}} \quad \text{Gleichung 2-2}$$

Ist die Ausdehnung des homogenen Umfeldes hinreichend groß, entspricht die Adaptationsleuchtdichte der Umfeldleuchtdichte und es ist von Totaladaptation auszugehen [HENTSCHEL 2002]. Damit ergibt sich für den Kontrast das in Gleichung 2-3 dargestellte, vereinfachte Verhältnis.

$$K = \frac{\Delta L}{L_{\text{U}}} \quad \left| \quad K \in [-1, \infty) \quad \text{Gleichung 2-3} \right.$$

In Abhängigkeit des Vorzeichens wird entweder vom Negativ- oder Positivkontrast gesprochen. Je höher der Betrag des Kontrasts, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit (p), mit der das Sehobjekt vom Beobachter erkannt wird.

Zur Quantifizierung der Detektionsleistung wird der Schwellenbegriff eingeführt. Die Schwelle² (th) definiert den Mindestwert einer Bezugsgröße, damit ein Objekt theoretisch als erkannt gilt. Üblicherweise wird die Detektionsschwelle bei einer Detektionsrate von $p_{\text{th}} = 50 \%$ (bzw. $p_{\text{th}} = 0,5$) [CIE-095 1992] ermittelt.

Die Kontrastschwelle (K_{th}) ist von vielfältigen Einflussfaktoren abhängig. So sind neben Helligkeitsfaktoren auch Sehobjektfaktoren, Ortsfaktoren, Zeit- und Geschwindigkeitsfaktoren, Personenfaktoren sowie Messmethode und Messkriterien zu nennen. Für eine übersichtliche Beschreibung der genannten Faktoren sei auf die Arbeit von [VÖLKER 2006] verwiesen.

2.3 Sehobjekt und Sehaufgabe

Zur Bestimmung der Objektdetektion im Anwendungsgebiet der Straßenbeleuchtung wird vorwiegend untersucht, ob ein gezeigtes Sehobjekt aufgrund seines Helligkeitsunterschieds gegenüber seinem Hintergrund wahrgenommen werden kann oder nicht. Es ist leicht nachvollziehbar, dass diese Aufgabe nicht unbedeutend für die Sicherheit im Verkehrswesen ist.

Die Straßenbeleuchtung soll die Durchführung dieser Sehaufgabe unterstützen, indem sie zu einer verbesserten Erkennbarkeit von Objekten beitragen soll. Hierbei hat sich für die Wahl eines geeigneten kritischen Sehobjekts die quadratische Graukarte mit einer Kantenlänge von $l = 20 \text{ cm}$ als De-facto-Standard etabliert. In einer Beobachtungsentfernung von $a = 100 \text{ m}$ entspricht dies einer Sehobjektgröße von etwa $\alpha_{\text{Obj}} = 7'$.

² Der Index ,th' leitet sich von dem englischsprachigen Begriff ,threshold' (dt. Schwelle) ab.

Diese allgemein anerkannte Sehaufgabe bildete die Basis vieler Untersuchungen, aus denen die noch heute gültigen Gütekriterien der Straßenbeleuchtung (vgl. Abschnitt 1.1) abgeleitet wurden [RAYNHAM 2004]. Abbildung 2-8 zeigt drei solcher Sehobjekte mit unterschiedlichen Reflexionsgraden auf der Teststraße in Ilmenau.

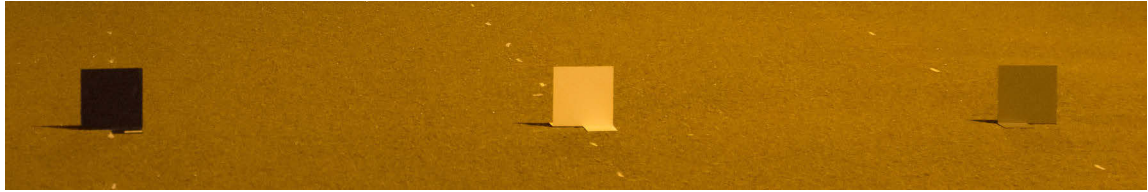


Abbildung 2-8: Sehobjekte in Form quadratischer Grautafeln mit verschiedenen Reflexionsgraden [Foto: I. HERZOG, Ilmenau].

Dieser üblichen Sehaufgabe stehen auch kritische Meinungen gegenüber. [RAYNHAM 2004] merkt an, dass die Verwendung der Standardgraukarte in einer Entfernung von 100 m nicht den aktuellen Ansprüchen einer relevanten Sehaufgabe genügt. Er begründet dies damit, dass diese Entfernung aufgrund des Blickverhaltens der Fahrer und der vorherrschenden Verkehrsdichte heutzutage nicht mehr praxisnah erscheint. Entsprechend fordert er eine Sehaufgabe bei geringerem Abstand, d. h. mit größeren Objekten, die nicht nur foveal sondern auch peripher dargeboten werden.

Die Kritik an rein fovealen Untersuchungen findet sich auch in anderen Arbeiten wieder. Nach [FOTIOS 2005] charakterisieren sich die meisten Sehaufgaben dadurch, dass sie zunächst extrafoveal im Gesichtsfeld erkannt werden müssen, bevor der Blick auf sie gelenkt wird, um sie zu diskriminieren und identifizieren. [INDITSKY 1982] bezeichnet die periphere Wahrnehmung als elementaren Bestandteil des Sehprozesses, da sie die Abbildung des visuellen Raumes erst ermöglicht.

Für eine weitere Vertiefung wird auf die Schrift [CIE-100 1992] verwiesen, die sich dieses Themas angenommen hat und die Vielfalt der Sehaufgaben und Sehbedingungen detailliert beschreibt.

Zusammenfassend wird die allgemein anerkannte Sehaufgabe aufgrund ihrer weiten Verbreitung für die Untersuchungen dieser Arbeit gewählt, wobei die kritischen Meinungen berücksichtigt werden. Hinsichtlich der Objektgröße wird festgelegt, dass sich das Objekt im vorderen Teil des Bewertungsfeldes mit einer Beobachtungsentfernung von $a = 62,5 \text{ m}$ ($\alpha_{\text{Obj}} \approx 11'$) befindet. Dies entspricht etwa der vorderen Objektreihe in Abbildung 2-1. Ebenso wurde neben der fovealen Darbietung auch die periphere Detektionsleistung in der Zielstellung (vgl. Abschnitt 1.2) formuliert.

Im Gegensatz zum realen Umfeld, in dem die Graukarte physisch im Bewertungsfeld positioniert wird, wird im Labor vorwiegend mit virtuellen Testreizen gearbeitet, deren Darbietungsdauer (t_{Obj}) sehr variabel und exakt gestaltet werden kann. Zur Anbindung an praxisnahe Situationen orientiert sich die Darbietungsdauer des Sehobjektes an der Fixationsdauer des Blickverhaltens bei der Durchführung einer Fahraufgabe. Hierzu gibt

[ECKERT 1993] einen Wertebereich von $t_{\text{Obj}} = 200 \dots 400$ ms an. Nach [ADRIAN 1993] ist eine Dauer von $t_{\text{Obj}} = 200$ ms weit verbreitet. Bezugnehmend auf diese Angaben wird für die vorliegende Arbeit eine Darbietungsdauer von ebenfalls $t_{\text{Obj}} = 200$ ms festgelegt.

2.4 Störgrößen

Unter Störgrößen werden Einflussgrößen verstanden, die der Objekterkennung nicht inhärent sind, sich aber dieser nachteilig überlagern. Die Folge sind erschwerte Sehbedingungen, welche die Sehleistung beeinträchtigen. Diese Arbeit berücksichtigt mit der physiologischen Blendung (B) und dem Regenereignis (R) zwei für die Straßenbeleuchtungspraxis typische Störgrößen.

2.4.1 Physiologische Blendung

Physiologische Blendung führt zu einer Erhöhung der Kontrastschwelle und erschwert hierdurch die Erkennbarkeit von Objekten. Die Ursache der physiologischen Blendung ist auf die, der Blendwirkung äquivalenten, Schleierleuchtdichte³ (L_v) zurückzuführen. Dabei ist genaugenommen zwischen der intraokularen und extraokularen Schleierleuchtdichte zu unterscheiden. Erstgenannte operationalisiert ein ideales Streulicht, welches durch Wechselwirkungen zwischen einfallendem Licht der Blendquelle und den Augenmedien entsteht (vgl. Abbildung 2-2). Letztere entsteht durch Streulicht außerhalb des Auges, verursacht durch die Streuung des Lichtes in der Atmosphäre [CIE-146 2002] sowie in optischen Medien wie beispielsweise Brillen oder Windschutzscheiben.

Die Schleierleuchtdichte überlagert sich auf der Retina mit der Leuchtdichte des abgebildeten Sehobjekts und resultiert in einer Kontrastreduktion, die wiederum eine Schwellenerhöhung erfordert, um die gleichbleibende Erkennbarkeit des Objekts zu erhalten (vgl. [ADRIAN 1989]). Den mathematischen Zusammenhang zeigt Gleichung 2-4.

$$K = \frac{(L_{\text{Obj}} + L_v) - (L_u + L_v)}{(L_u + L_v)} = \frac{L_{\text{Obj}} - L_u}{(L_u + L_v)} = \frac{\Delta L}{(L_u + L_v)} \quad \text{Gleichung 2-4}$$

Die Operationalisierung der physiologischen Blendung mittels Schleierleuchtdichte ist auf die Arbeit von [HOLLADAY 1926] zurückzuführen. Die weiterführenden Arbeiten von [STILES 1929] und [STILES 1937] trugen dazu bei, den in Gleichung 2-5 gezeigten Zusammenhang zu formulieren. Darin enthalten sind die durch die Blendquelle (BQ) am Auge in vertikaler Ebene verursachte Blendbeleuchtungsstärke (E_B), ein Altersfaktor (k), der das Alter (A) des Beobachters berücksichtigt, sowie der Blendwinkel (θ_B), der sich zwischen der Blickrichtung des Beobachters und der Geraden zwischen Beobachter und Blendquelle aufspannt [CIE-146 2002]. Der Zusammenhang gilt für punktförmige Blendquellen und einen Winkelbereich von $1^\circ < \theta_B < 30^\circ$.

³ Der Index ‚v‘ leitet sich von dem englischsprachigen Begriff ‚veiling‘ (dt. Schleier) ab.

$$L_v = k \cdot \sum_{BQ=1}^n \left(\frac{E_{B,BQ}}{\Theta_{B,BQ}^2} \right) \quad \left| \quad k = 9,86 \cdot \left[1 + \left(\frac{A}{66,4} \right)^4 \right] \right. \quad \text{Gleichung 2-5}$$

Die Beleuchtungsstärke am Auge lässt sich durch Anwendung des Raumwinkelprojektionsgesetzes nach Gleichung 2-6 auf die Parameter der Blendquelle zurückführen. Hierzu zählen die Leuchtdichte der Blendquelle (L_{BQ}), deren Position im Gesichtsfeld, die dem Blendwinkel (Θ_B) entspricht, sowie die räumliche Ausdehnung der leuchtenden Fläche, die durch den Raumwinkel (Ω_{BQ}) beschrieben ist [CIE-146 2002].

$$E_B = L_{BQ} \cdot \cos(\Theta_B) \cdot \Omega_{BQ} \quad \text{Gleichung 2-6}$$

Zur Quantifizierung der Blendwirkung entwickelte [EICHHOFF 1970] den in Gleichung 2-7 gezeigten Zusammenhang. Die Größe TI_{EICHHOFF} beschreibt die relative Erhöhung der Leuchtdichteschwelle nach EICHHOFF in Prozent, die sich aus den erforderlichen Unterschiedsschwellen mit (ΔL_B) und ohne Blendung (ΔL) ergibt.

$$TI_{\text{EICHHOFF}} = \left(\frac{\Delta L_B}{\Delta L} - 1 \right) \cdot 100\% \quad \text{Gleichung 2-7}$$

Hierauf basierend wurde die in Gleichung 2-8 gezeigte Näherungsformel für die Schwellenerhöhung abgeleitet, mit der die physiologische Blendwirkung in der Straßenbeleuchtungspraxis bewertet wird. Der zulässige Höchstwert beträgt nach [DIN EN 13201-2] $TI = 20\%$.

$$TI = 65 \cdot \frac{L_v}{L_u^{0,8}} \% \quad \text{Gleichung 2-8}$$

Die hier dargestellten Methoden zur Quantifizierung physiologischer Blendung basieren auf einer integralen Bewertung der Strahlungsleistung. Demnach wird die, durch Abbildung der Blendquellen auf der Netzhaut verursachte, lokale Überhöhung der dortigen Rezeptoraktivität nicht berücksichtigt. Ebenso bieten die Methoden keine Möglichkeit, Einflüsse der Lichtfarbe auf die physiologische Blendwirkung, z. B. in Form eines Farbfaktors, zu erfassen. Bei Beleuchtungssituationen mit vergleichbaren Strahlungsleistungen ist jedoch zu erwarten, dass jene mit einem höheren Anteil kurzwelliger Strahlung zu einer stärkeren Blendwirkung führen. Begründet wird dies einerseits mit den Erkenntnissen aus Abschnitt 2.1.1. So führt die Beteiligung der Stäbchen am Sehprozess unter mesopischen Bedingungen zu einer erhöhten Empfindlichkeit bei kurzwelligem Licht. Andererseits werden die kurzwelligen Lichtstrahlen von den Augenmedien stärker gestreut, wodurch die Bildung eines Schleiers begünstigt wird.

2.4.2 Regen

Regen ist eine physisch existente Störgröße. Meteorologisch gilt er als fallender Hydrometeor und gehört damit zur Gruppe der Niederschläge. Normativ werden Regenereignisse anhand von Regenintensität (I_R), d. h. der Niederschlagsmenge pro Zeit, und Tropfendurchmesser (d_R) in sechs Klassen unterteilt (Tabelle 2-1).

Tabelle 2-1: Regenklassen nach [DIN IEC 60721-2].

Regenklasse	Regenart	I_R (mm/h)	d_R (mm)
1	Sprühregen und sehr leichter Regen	< 1	0,001 – 0,1
2	Leichter Regen	< 1	0,1 – 0,5
3	Mäßiger Regen	1 – 4	0,5 – 1,0
4	Intensiver Regen	4 – 15	1,0 – 2,0
5	Schwerer Regen	15 – 40	2,0 – 5,0
6	Wolkenbruch	> 100	> 3,0

Das Auftreten eines Regenereignisses führt zu einer Trübung des optischen Mediums. Diese Trübung kann technisch als Rauschen beschrieben werden. Beim Durchlaufen eines derartigen Mediums erfahren Lichtstrahlen eine Schwächung. Dieser als Extinktion bezeichnete Vorgang wird durch Absorptions- und Streueffekte verursacht, die durch Wechselwirkung mit den Trübstoffen, in diesem Fall den Regentropfen, entstehen. Die Absorption führt zu Abschattungen, die Streuung zu einer extraokularen Verschleierung (vgl. Abschnitt 2.4.1) des Sichtfeldes (TYNDALL-Effekt). Es kommt zu einer Sichtweiten- und Kontrastreduzierung. BOUGUER und LAMBERT beschrieben die Extinktion mathematisch durch die in Gleichung 2-9 gegebene Exponentialfunktion [GALL 2004].

$$\tau(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} = e^{-\mu(\lambda) \cdot w} \quad \text{Gleichung 2-9}$$

Hierin sind $I_0(\lambda)$ die Ausgangslichtstärke und $I(\lambda)$ die Lichtstärke nach Durchlaufen der Strecke (w) im optisch trüben Medium. Das Verhältnis dieser beiden Größen ergibt den spektralen Transmissionsgrad ($\tau(\lambda)$). Die spektralen Koeffizienten für Absorption ($\alpha(\lambda)$) und Streuung ($\delta(\lambda)$) werden gemäß Gleichung 2-10 durch Summation zu dem spektralen Extinktionskoeffizienten ($\mu(\lambda)$), der häufig auch als Abschwächungskoeffizient bezeichnet wird, zusammengefasst.

$$\mu(\lambda) = \alpha(\lambda) + \delta(\lambda) \quad \text{Gleichung 2-10}$$

Der Absorptionskoeffizient von Wasser (respektive Regen) ist im Bereich des sichtbaren Spektrums sehr klein [BUI TEVELD 1994]. Für eine Wellenlänge von $\lambda = 550 \text{ nm}$ beträgt er $\alpha_{550\text{nm}} = 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$. Daher kann er für die weitere Betrachtung vernachlässigt werden,

wodurch der Extinktionskoeffizient proportional zur Streuung wird [ARMBRUSTER 2000], [ROSENHAHN 1999]. Die Streuung ist wiederum abhängig von der Teilchengröße und -dichte des optischen Mediums. Je höher die Teilchendichte, desto geringer ist deren mittlerer Abstand zueinander und desto größer ist der Einfluss von Mehrfachstreuung [PAUL 1999-1]. Für Tropfengrößen mit einem Durchmesser von $d_R \geq \lambda$ tritt Mie-Streuung auf [PAUL 1999-2]. Dabei wird die Strahlung mit steigendem Teilchenradius zunehmend in Vorwärtsrichtung gestreut; zugleich nimmt die Wellenlängenabhängigkeit der Streuung ab.

Neben den extinktionsbedingten Beeinträchtigungen kann die optische Wahrnehmung der bewegten Trübstoffe zu einer Ablenkung von der Sehaufgabe führen. Im Fall von Regen tritt dies insbesondere bei größeren Tropfen auf, da diese visuell besser erkennbar sind. Das hierdurch entstehende charakteristische Erscheinungsbild des Regenereignisses bewirkt eine inhomogene Trübung des Mediums. Diese störende Wirkung kann durch Flimmereffekte (Sparkle-Effekt), die aufgrund von Lichtreflexionen an den Tropfen entstehen, verstärkt werden. Flimmernde Reize solch bewegter Objekte erscheinen heller als statische Objekte gleicher Leuchtdichte und können neben der bereits beschriebenen Ablenkung auch zu Blendung und Ermüdung führen. [BARTLEY 1938], [BARTLEY 1951], [BULLOUGH 2001].

Für diese Arbeit sind insbesondere die in Verbindung mit den Regentropfen auftretenden Streuungs- und Flimmereffekte von Interesse, da die Absorptionseffekte vereinfacht mit einer Reduktion des Leuchtdichteniveaus gleichzusetzen sind. Da zur Hervorhebung von Streuung und Flimmern die Tröpfchengröße von Bedeutung ist, sollen zwei verschiedene Regenarten berücksichtigt werden, die sich deutlich voneinander unterscheiden. Entsprechend der obigen Ausführungen empfiehlt sich für das erhöhte Auftreten von Streuung eine Regenart mit hoher Tropfendichte und kleinen Tropfendurchmessern, wohingegen Flimmereffekte bei einem Regenereignis mit größeren Tropfendurchmessern erwartet werden.

Kapitel 3 Stand der Forschung

Zur Aufarbeitung des gegenwärtigen Kenntnisstandes werden in diesem Kapitel ausgewählte Forschungsarbeiten zur Thematik analysiert. Hierzu werden in den ersten beiden Abschnitten die Versuchsdurchführungen und deren Ergebnisse bei normalen und erschwerten Sehbedingungen beschrieben. In dem sich anschließenden Vergleich werden die Forschungsansätze hinsichtlich ihrer Ergebnisse und Methodiken gegenübergestellt und diskutiert. Die daraus hervorgehenden Erwartungen bezüglich der Variablen dieser Arbeit werden in Form der Forschungshypothesen formuliert.

3.1 Studien bei normalen Sehbedingungen

[LEWIS 1999] führte Kontrastschwellenmessungen durch, um die Sehleistung als Funktion der Spektralverteilung und Leuchtdichte zu untersuchen. Seine Studie umfasst die Spektren einer Glüh- (GL), Quecksilberhochdruck- (HPM), Natriumhochdruck- (HPS), Natriumniederdruck- (LPS) sowie einer Metallhalogenlampe (MH) bei jeweils vier verschiedenen Adaptationsniveaus (0,1; 1,0; 3,0; 10,0 cd/m²). Als Sehobjekt verwendete er ein sinusförmiges Raster mit einer Größe von $\alpha_{\text{Obj}} = 13^\circ \times 10^\circ$, das monokular unter MAXWELL'scher Beobachtung mit einer Darbietungszeit von $t_{\text{Obj}} = 750$ ms präsentiert wurde. Es nahmen insgesamt fünf normalsichtige und für die Experimente trainierte Versuchspersonen teil. Für die Festlegung der Schwelle wählte LEWIS eine Erkennungswahrscheinlichkeit von $p_{\text{th}} = 0,75$. In seiner Ergebnisdarstellung normierte er die, bei den verschiedenen Lichtfarben erzielten, Kontrastschwellen auf diejenigen der Glühlampe. Bei den oberen beiden Leuchtdichteniveaus (3,0; 10,0 cd/m²) ergaben sich keine signifikanten Unterschiede der relativen Kontrastschwellen in Abhängigkeit des Lampenspektrums. Hingegen sind bei den beiden niedrigen Leuchtdichteniveaus (0,1; 1,0 cd/m²) signifikante Einflüsse gefunden worden; Lichtquellen mit einem vergleichbar hohen Anteil kürzerer Wellenlängen führen zu geringeren Schwellen. Die geringsten Schwellen wurden für MH erreicht, gefolgt von GL, HPM, HPS und LPS.

FOTIOS untersuchte in seinen Forschungsarbeiten [FOTIOS 2009] und [FOTIOS 2013] den Einfluss von drei verschiedenen ähnlichsten Farbtemperaturen (CCT)⁴, die er mit den

⁴ CCT: Correlated Colour Temperature (dt. ähnlichste Farbtemperatur).

Lichtquellen HPS ($CCT = 2000\text{ K}$; $s/p = 0,57$), CPO ($CCT = 2730\text{ K}$; $s/p = 1,22$) und CDM ($CCT = 4200\text{ K}$, $s/p = 1,77$) erzielte, auf die periphere Objektdetektion bei jeweils drei verschiedenen Leuchtdichteniveaus ($0,01$; $0,1$; $1,0\text{ cd/m}^2$). Hierzu wurden in einem mechanisch aufwendigen Versuchsaufbau zylindrische Sehobjekte an insgesamt vier Positionen (0° ; $14,8^\circ$; $27,9^\circ$; $42,0^\circ$) rechtsseitig von einem Fixationspunkt vorgesehen. Die Sehobjekte waren in dem Boden der Apparatur eingelassen; ihre Höhe konnte mit einem motorischen Antrieb verändert werden. Die maximal erreichte Objekthöhe ist mit $7,94\text{ mm}$ angegeben. Für die Objektbreite lässt sich aus der Versuchsbeschreibung ein Wert von 90 mm abschätzen. Unter Annahme eines mittleren Beobachtungsabstands von 720 mm ergibt sich für das Sehobjekt ein Größenbereich $\alpha_{\text{Obj}} = (0,03^\circ \dots 0,63^\circ) \times 7^\circ$. Die Objektdarbietung erfolgte in zufälliger Reihenfolge mit variierenden Höhen bei jeweils $t_{\text{Obj}} = 300\text{ ms}$ und monokularer Betrachtung. Anhand der Höhe der Sehobjekte wurde die Detektionsschwelle für eine Erkennungsrate von $p_{\text{th}} = 0,5$ bestimmt. An der Studie beteiligten sich zwei, nach Alter getrennte, Probandengruppen. Die Gruppe der Jüngeren ($A < 45\text{ Jahre}$) umfasste 11, die der Älteren ($A > 60\text{ Jahre}$) 10 Personen.

FOTIOS konnte einen signifikanten Einfluss der Lichtfarbe für das niedrigste Leuchtdichtenniveau von $0,01\text{ cd/m}^2$ finden, wobei mit der CDM (4200 K) die beste Detektionsleistung erreicht wurde, gefolgt von der CPO (2730 K) und HPS (2000 K). Für die übrigen Leuchtdichten ($0,1$; $1,0\text{ cd/m}^2$) konnte kein signifikanter Einfluss auf die periphere Objektdetektion gefunden werden. Nachgewiesen wurde auch ein Anstieg der Detektionsleistung bei zunehmender Leuchtdichte. Diese Unterschiede sind signifikant für jede Lichtquelle bei allen untersuchten Leuchtdichteniveaus.

[BLUMTRITT 2004] untersuchte den Einfluss der Farbtemperatur zweier Entladungslampen (CDM, $CCT = 4200\text{ K}$) und (SON, $CCT = 1900\text{ K}$) auf die foveale und periphere Objektdetektion bei mesopischen Umgebungsleuchtdichten ($0,3$; $0,5$; $1,0$; $1,5$; $2,0\text{ cd/m}^2$) mit Hilfe eines Bogenperimeters. Als Sehobjekt verwendete er eine dimmbare Glühlampe, die den insgesamt 10 Beobachtern unter einem Sehwinkel von $\alpha_{\text{Obj}} = 10'$ erschien und an insgesamt sieben Positionen im Gesichtsfeld ($0,0^\circ$; $0,3^\circ$; $1,5^\circ$; $3,0^\circ$; $5,0^\circ$; $10,0^\circ$; $20,0^\circ$) gezeigt wurde. Durch Regelung des Glühlampenstroms konnten verschiedene Positivkontraste gegenüber der jeweiligen Umgebungsleuchtdichte eingestellt werden. Per Grenzverfahren wurde die Leuchtdichteschwelle ermittelt.

Die Ergebnisse zeigen einen Einfluss von Adaptationsniveau und Sehobjektwinkel auf die Leuchtdichteschwelle. Mit zunehmendem Adaptationsniveau steigt die Leuchtdichteschwelle signifikant an. Ebenso erhöht sich die Schwelle bei jedem der untersuchten Leuchtdichteniveaus, je weiter das Objekt von der Sehachse entfernt ist. Diese Einflüsse sind für benachbarte Objektpositionen bei nahezu jedem Leuchtdichtenniveau ab Winkeln von $\theta_{\text{Obj}} = 1,5^\circ \dots 3,0^\circ$ signifikant. Hinsichtlich der Lichtfarbe konnte mit dem Spektrum der SON, welches einen relativ hohen Anteil langewelliger Strahlung beinhaltet, für jede der untersuchten Adaptationsleuchtdichten eine geringere Schwelle und damit eine bessere Sehleistung erzielt werden. Mit zunehmendem Exzentrizitätswinkel

steigt dieser Einfluss, d. h., die Unterschiede zwischen den Leuchtdichteschwellen bei Beleuchtung mit SON und CDM werden größer. Ab einem Objektwinkel von $\Theta_{\text{Obj}} = 5^\circ$ werden diese Unterschiede bei allen untersuchten Leuchtdichteniveaus signifikant.

[FREIDING 2007] beschreibt eine experimentelle Laboruntersuchung zur Bestimmung der Kontrastschwelle für breitbandige Reize. Ein Perimeter mit einem Durchmesser von $d = 600$ mm wurde mit einer Metaldampflampe in vier verschiedenen Leuchtdichten ($0,01$; $0,1$; $1,0$; $10,0$ cd/m^2) bei einer Farbtemperatur von jeweils $CCT = 4000$ K beleuchtet. Als Stimulus wurde ein $\alpha_{\text{Obj}} = 1,5^\circ \times 2^\circ$ großes, elliptisches Sehzeichen peripher unter einem Winkel von $\Theta_{\text{Obj}} = 10^\circ$ links vom Fixationspunkt gezeigt. Die Objektdarbietung erfolgte im Positivkontrast und quasistatisch mit einer Dauer von $t_{\text{Obj}} \geq 3$ s. Mit Farbfiltren wurde die Lichtfarbe des Stimulus zwischen Blau, Grün und Rot variiert. Die Leuchtdichte des Sehobjektes wurde von fünf Testpersonen bei binokularer Betrachtung derart angepasst, dass es gerade noch zu erkennen war (Herstellungsmethode).

Aus der Studie geht hervor, dass die Kontrastschwelle für alle untersuchten Farben mit zunehmender Adaptationsleuchtdichte abnimmt. Dies ist gleichbedeutend mit einer Erhöhung der Detektionsleistung bei höheren Umgebungshelligkeiten. Bei dem geringsten Leuchtdichteniveau von $L_{\text{adapt}} = 0,01$ cd/m^2 wird mit dem blauen Stimulus die niedrigste Kontrastschwelle und damit die höchste Detektionsleistung erzielt. In nahezu gleichen Abständen folgen die Kontrastschwellen des grünen und des roten Stimulus, wobei bei letzterem die geringste Detektionsleistung (höchste Schwelle) ermittelt wurde. Mit zunehmender Umgebungsleuchtdichte nimmt die Kontrastschwelle bei rotem Stimulus am stärksten ab und konvergiert bei etwa $L_{\text{adapt}} = 1,0$ cd/m^2 mit der Kontrastschwelle des grünen Stimulus. Hingegen bleibt der Unterschied der Kontrastschwellen bei grünem und blauem Stimulus nahezu konstant für alle untersuchten Helligkeitsniveaus.

[BULLOUGH 2000] untersuchte die periphere Objektdetektion mit sechs Versuchspersonen anhand einer dynamischen Sehaufgabe, bei der ein Auto auf einem virtuellen Rundkurs gesteuert wurde. Die Darbietung erfolgte mit einem LCD⁵-Projektor auf einer Leinwand, deren Abstand zum Beobachter $a \approx 3,35$ m betrug. Es wurden die vier Spektralverteilungen HPS ($s/p = 0,64$), Rot ($s/p = 1,35$), MH ($s/p = 1,78$), und Blau ($s/p = 3,77$) bei jeweils vier mittleren Leuchtdichteniveaus ($0,1$; $0,3$; $1,0$; $3,0$ cd/m^2) untersucht. Als Sehobjekt diente ein $\alpha_{\text{Obj}} = 2,4^\circ \times 3^\circ$ großes Testzeichen, das mit einem Winkel von $\Theta_{\text{Obj}} = 18^\circ$ im rechten unteren Bereich der Projektionswand positioniert wurde. Während der Ausübung der Sehaufgabe wurde das Sehobjekt mit festem Kontrast ($K = 0,78$) in zufälligen Intervallen und einer Darbietungszeit von $t_{\text{Obj}} \approx 0,5$ s gezeigt. Für die Operationalisierung der Detektionsleistung wurde die Verpasserrate (p_v) verwendet. Sie gibt den prozentualen Anteil der gezeigten Sehobjekte an, die von der Testperson nicht erkannt wurden (vgl. Tabelle 4-2).

⁵ LCD: Liquid Crystal Display (dt. Flüssigkristallanzeige).

Mit zunehmendem Leuchtdichteniveau reduzierte sich die Verpasserrate signifikant, was einer Erhöhung der Detektionsleistung entspricht. Wesentlich stärker als angenommen erwies sich der Einfluss der Lichtfarbe. Für alle untersuchten Leuchtdichten konnte eine signifikant positive Korrelation zwischen dem s/p -Verhältnis und der Detektionsleistung gezeigt werden, d. h. die Objekterkennung verbesserte sich mit steigendem Blauanteil.

[LINGARD 2002] erstellte eine umfassende Studie zur Wirkung von Lichtfarbe und Adaptationsleuchtdichte auf die Detektion peripherer Sehobjekte bei Ausübung einer dynamischen Sehaufgabe. Auf einer semitransparenten Leinwand wurde mit einem Projektor ein virtueller Rundkurs abgebildet, auf dem vier Versuchspersonen ($A = 25 \dots 34$ Jahre) eine Fahraufgabe absolvierten. Der Abstand zwischen Leinwand und Beobachter betrug $a = 1,2$ m. Mittels Filter wurde die projizierte Sehaufgabe bei insgesamt vier Hintergrundleuchtdichten ($0,1; 0,3; 1,0; 3,0 \text{ cd/m}^2$) und zwei Lichtfarben erprobt. Die Lichtfarbeneinstellung orientierte sich an dem s/p -Verhältnis einer HPS ($s/p = 0,5$) sowie einer MH ($s/p = 1,8$) Lampe. Ein kreisförmiges Sehobjekt mit einer Größe von $\alpha_{\text{Obj}} \approx 2^\circ$ wurde links und rechts vom Fixationspunkt an vier Positionen ($12^\circ; 18^\circ; 24^\circ; 29^\circ$) in jeweils vier Kontrastabstufungen ($0,1; 0,4; 0,7; 1,0$) dargeboten. Hierzu wurden hinter der Leinwand mit Glühlampen betriebene Lichtkästen positioniert. Die maximale Darbietungsdauer eines Objektes betrug $t_{\text{Obj}} = 1,25$ s, wobei für die Anlaufzeit des Leuchtmittels (Trägheit) bis zum Erreichen der Soll-Intensität ein Wert von $t = 0,25$ s angegeben wird.

LINGARD konnte zeigen, dass sich die Detektionsrate tendenziell mit steigendem Objektkontrast erhöht, wobei der Unterschied zwischen den beiden untersten Kontraststufen am deutlichsten ausgeprägt ist. Ebenfalls ist mit Erhöhung der Adaptationsleuchtdichte eine tendenzielle Zunahme der Detektionsrate zu verzeichnen. Dies gilt nahezu für alle Lichtfarben, Kontraststufen und Objektpositionen. Einzige Ausnahme bildet hier die MH Beleuchtungssituation. Bei geringster Kontraststufe ist eine Reduktion der Detektionsrate bei zunehmender Leuchtdichte über alle Objektpositionen erkennbar, die allerdings auf methodische Störgrößen der Versuchsanordnung zurückgeführt wird. Ein signifikanter Einfluss der Lichtfarbe auf die Objektdetektion ergibt sich bei niedrigen Adaptationsleuchtdichten ($L_{\text{adapt}} \leq 0,3 \text{ cd/m}^2$) in Verbindung mit geringen Objektkontrasten ($K \leq 0,4$). Unter diesen Bedingungen konnten mit der MH Beleuchtungssituation deutlich höhere Detektionsraten nachgewiesen werden. Die Variation der Objektposition bewirkt einzig für die größte Exzentrizität ($\theta_{\text{Obj}} = 29^\circ$) eine Reduktion der Objektdetektion.

[ALFERDINCK 2006] verwendete eine dynamische Sehaufgabe in einem Fahrsimulator mit realem Fahrzeugchassis. Ein 21 Personen umfassendes Kollektiv ($A_{\text{MW}} = 21,9$ Jahre) steuerte ein virtuelles Fahrzeug mit konstanter Geschwindigkeit entlang eines einspurigen Rundkurses, der auf einer Projektionsfläche im Abstand von $a = 3,75$ m dargeboten wurde. Die projizierte Szenerie wurde bei vier unterschiedlichen Lichtfarben (Weiß, Gelb, Rot, Blau) und jeweils vier Adaptationsniveaus ($0,01; 0,1; 1,0; 10,0 \text{ cd/m}^2$) präsentiert. Einzige Ausnahme bildete die höchste Helligkeitsstufe, bei der aus technischen Gründen lediglich die Farben Weiß und Gelb realisiert werden konnten. Ein kreis-

förmiges Sehobjekt der Größe $\alpha_{\text{Obj}} = 2^\circ$ wurde peripher links und rechts der Fahrbahn an sechs Positionen (-15° ; -10° ; -5° ; $+5^\circ$; $+10^\circ$; $+15^\circ$) mit einer Dauer von jeweils $t_{\text{Obj}} = 3$ s in zufälliger Abfolge gezeigt. Das Objekt hatte zu seinem Hintergrund einen festen Kontrast von durchschnittlich $K = 0,14$. Operationalisiert wurde die Objektdetektion durch die Verpasserrate (p_v), d. h. die relative Anzahl nicht erkannter Sehobjekte (vgl. Tabelle 4-2). Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die Haupteffekte (Adaptationsniveau, Lichtfarbe, Objektposition) signifikante Einflüsse auf die Objektdetektion bewirken. Mit steigender Umgebungsleuchtdichte reduziert sich die Verpasserrate asymptotisch von anfänglich über 30 % ($L_{\text{adapt}} = 0,01$ cd/m²) auf etwa 6 % ($L_{\text{adapt}} \geq 1,0$ cd/m²). Hinsichtlich der Objektposition erhöht sich die Verpasserrate über alle Lichtfarben mit steigendem Peripheriewinkel von etwa 10 % (5° ; 10°) auf 15 % (15°). Einflüsse durch die Lichtfarbe zeigen sich deutlich für das unterste Leuchtdichteniveau ($0,01$ cd/m²). Die schlechteste Objekterkennung wird mit Rot erzielt. Hier liegen die Verpasserraten je nach Objektposition zwischen etwa 70...100 %. Wenig unterschieden sich Gelb und Blau mit Verpasserraten im Bereich von 15...30 %. Die beste Erkennbarkeit wird mit weißem Hintergrund erreicht. Hier liegen die Verpasserraten in einem Bereich < 10 %. Bei dem Leuchtdichteniveau von $0,1$ cd/m² befinden sich die Verpasserraten aller untersuchten Farben unterhalb 15 %. Lediglich bei rotem Hintergrund und höchstem Peripheriewinkel ($\pm 15^\circ$) beträgt die Verpasserrate noch knapp 30 %. Für die oberen beiden Helligkeitsniveaus ($1,0$; $10,0$ cd/m²) sind weder farblich noch durch die Objektposition bedingte Einflüsse auf die Erkennbarkeit nachweisbar. Die Verpasserrate liegt in beiden Fällen in einem Bereich $p_v < 5$ %.

[JAINSKI 1960] untersuchte an 10 Personen den Einfluss vier verschiedener Lichtfarben auf die Unterschiedsschwelle. Hierzu wurde ein kreisförmiges, $\alpha_{\text{Obj}} = 1^\circ$ großes Sehobjekt foveal in einem Abstand von $a = 2,5$ m bei verschiedenen Hintergrundleuchtdichten im Bereich von $L_{\text{adapt}} = 0,003...191$ cd/m² dargeboten. Sehobjekt und Hintergrundfeld hatten stets dieselbe Lichtfarbe. Die verschiedenen Lichtfarben erzielte er mit einer Glüh- (GL), Leuchtstoff- (LSL) und Natriumdampf- (NA) sowie einer Quecksilberdampf-hochdrucklampe mit Leuchtstoff (HgL + LS).

Für Leuchtdichten $L_{\text{adapt}} > 1$ cd/m² zeigten sich keine Wirkungen der untersuchten Lichtfarben auf die Unterschiedsschwelle. Für geringere Leuchtdichten führt lediglich die Leuchtstofflampe zu einer erkennbaren Verbesserung der Detektionsleistung. Die Stärke dieses Einflusses nimmt mit abnehmender Leuchtdichte zu. Dennoch schätzt der Autor die Praxisrelevanz dieser Erkenntnis als sehr gering ein, da der Einfluss bei straßentypischen Leuchtdichteniveaus noch relativ gering ausgeprägt ist.

[GREULE 1985] untersuchte die periphere Detektionsleistung bei drei Leuchtdichteniveaus ($0,5$; $2,0$; $4,0$ cd/m²). In einem Perimeter präsentierte er einem Versuchspersonenkollektiv, dessen Personenumfang nicht genannt ist, kreisförmige Testzeichen mit einer Größe von $\alpha_{\text{Obj}} = 20'$ und einer Darbietungsdauer von $t_{\text{Obj}} = 300$ ms. Bei binokularer

Beobachtung konnte er zeigen, dass mit zunehmendem Peripheriewinkel die relative Häufigkeit getarnter Fußgänger ansteigt. Dies ist gleichbedeutend mit einer Erhöhung der Kontrastschwelle. Die verringerte Umgebungsleuchtdichte führte zu einer Reduktion des Sichtbarkeitsfeldes, was wiederum einer Erhöhung der Kontrastschwelle mit zunehmendem Peripheriewinkel entspricht.

[FLECK 1988] untersuchte an einem CRT⁶-Monitor die Detektion eines Vollzeichens der Größe $\alpha_{\text{Obj}} = 27' \times 48'$ bei einem photopischen Leuchtdichteniveau, dessen Absolutwert nicht beziffert ist. Das Zeichen wurde ebenfalls für $t_{\text{Obj}} = 300 \text{ ms}$ mit zeitgleich auftretenden Störzeichen dargeboten. Auch hier zeigte sich ein Anstieg der Kontrastschwelle mit zunehmendem Abstand zur Sehachse. Hieraus geht hervor, dass die Detektion eines Sehzeichens durch Kontrasterhöhung bis weit in die Peripherie möglich ist. Insbesondere für die Anwendung im Straßenverkehr, die nach FLECK ein großes Sichtbarkeitsfeld fordert, ist ein guter Kontrast der wichtigen Sehobjekte vor einem möglichst homogenen Hintergrund eine notwendige Voraussetzung.

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Studien sind mit ihren wichtigsten Untersuchungsparametern in Tabelle 3-1 zusammengefasst. Die mit ‚VP‘ bezeichnete Spalte enthält die Anzahl der an der jeweiligen Studie beteiligten Versuchspersonen. Die jeweils vorherrschenden Sehbedingungen sind in der Spalte ‚Sehbeding.‘ mit den Merkmalen Versuchsumfeld (statisch; dynamisch), Art der Objektbetrachtung (monokular; binokular) und Beobachtungsentfernung (a) angegeben. Die Eigenschaften des adaptationsbestimmenden Feldes sind in den mit ‚Hintergrund‘ betitelten Spalten enthalten. Darin sind die mit ^{*)} versehenen Leuchtmittel (LM) bzw. Farben nicht nativen Ursprungs, sondern werden durch Verwendung eines Projektors mit Filter(n) nachgebildet. Angaben zu dem Sehobjekt können den letzten beiden Spalten entnommen werden. Nicht bekannte Informationen sind mit dem Hinweis ‚k. A.‘ (‚keine Angabe‘) versehen.

⁶ CRT: Cathode Ray Tube (dt. Kathodenstrahlröhre).

Tabelle 3-1: Studien zur Objektdetektion bei normalen Sehbedingungen.

Autor	VP	Sehbeding.	Hintergrund		Sehobjekt	
			LM/Farbe	L_{adapt} (cd/m ²)	θ_{Obj} (°)	LM/Farbe
[LEWIS 1999]	5	statisch, monokular, $a < 1$ m	GL HPM HPS/LPS MH	0,1 1,0 3,0 10,0	0	wie Hintergrd.
[FOTIOS 2009]	11/ 10	statisch, monokular, $a = 1,08$ m	HPS CPO CDM	0,01 0,1 1,0	0 +14,8 +27,9 +42,0	wie Hintergrd.
[BLUMTRITT 2004]	10	statisch, monokular, $a = 0,33$ m	SON CDM	0,3 0,5 1,0 1,5 2,0	0 +0,3 +1,5 +3,0 +5,0 +10,0 +20,0	GL
[FREIDING 2007]	5	statisch, binokular, $a = 0,6$ m	MH	0,01 0,1 1,0 10,0	-10	Blau Grün Rot
[BULLOUGH 2000]	6	dynamisch, binokular, $a = 3,35$ m	HPS ^{*)} Rot ^{*)} MH ^{*)} Blau ^{*)}	0,1 0,3 1,0 3,0	+18	wie Hintergrd.
[LINGARD 2002]	4	dynamisch, binokular, $a = 1,2$ m	HPS ^{*)} MH ^{*)}	0,1 0,3 1,0 3,0	±12 ±18 ±24 ±29	GL
[ALFERDINCK 2006]	21	dynamisch, binokular, $a = 3,75$ m	Weiß ^{*)} Gelb ^{*)} Rot ^{*)} Blau ^{*)}	0,01 0,1 1,0 10,0	±5 ±10 ±15	wie Hintergrd.
[JAINSKI 1960]	10	statisch, binokular, $a = 2,5$ m	GL NA LSL HgL + LS	0,003 ...191	0	wie Hintergrd.
[GREULE 1985]	k. A.	statisch, binokular, $a < 1,0$ m	k. A.	0,5 2,0 4,0	bis ca. ±50	k. A.
[FLECK 1988]	k. A.	statisch, binokular, $a < 1,0$ m	CRT	k. A.	9...30	k. A.

3.2 Studien bei erschwerten Sehbedingungen

[STADLER 1964] untersuchte, wie sich die Unterschiedsschwelle zwischen einem Testzeichen und der Fahrbahn beim Blick durch eine ‚beregnete‘ Windschutzscheibe mit und ohne Einwirkung physiologischer Blendung verändert. Für die Realisierung einer konstanten Beregnungssituation im Labor verwendete er eine mit Klarlacktröpfchen präparierte, ebene Glasscheibe. Im Abstand von $a \approx 2$ m vor der Scheibe befand sich eine perspektivisch korrekt dargebotene Abbildung einer Fahrbahn, die zur Einstellung der vier verwendeten Adaptationsniveaus (0,01; 0,1; 1,0; 8,0 cd/m²) mit Glühlampenlicht beleuchtet wurde. Knapp unter dem Schnittpunkt des Straßenverlaufs mit dem Horizont wurde ein kreisförmiges Sehobjekt der Größe $\alpha_{\text{Obj}} = 0,3^\circ$ foveal und statisch mittels eines Diaprojektors auf die Szenerie projiziert. Die Helligkeitsregelung des Sehzeichens erfolgte über einen motorisch verstellbaren Graukeilfilter vor dem Projektor. Rechtsseitig der Fahrbahn befanden sich insgesamt 10 Blendquellen, deren Größe und Anordnung der perspektivischen Abbildung einer üblichen Straßenbeleuchtungsanlage entsprachen. An der Untersuchung nahm lediglich eine Person teil, die bei jeder Versuchssituation jeweils solange einen Knopf betätigte, bis das Sehzeichen merklich sichtbar wurde. Die Objektdarbietungszeit entsprach somit der Verstellgeschwindigkeit des Graukeils.

Gegenüber ungestörten Sehbedingungen, die ohne Scheibe durchgeführt wurden, erhöhte sich die Leuchtdichteschwelle bei ‚beregneteter‘ Scheibe in Abhängigkeit der Fahrbahnleuchtdichte um einen Faktor zwischen 1,6...2,0. Die Untersuchungen mit Blendung erfolgten bei drei verschiedenen Blendbeleuchtungsstärken (0,06; 0,6; 1,8 lx). Dabei steigt der Einfluss der Blendung mit zunehmender Blendbeleuchtungsstärke und sinkendem Adaptationsniveau. Für ein straßentypisches Leuchtdichteniveau von 1,0 cd/m² führte die Blendung bei ‚beregneteter‘ Scheibe gegenüber ungestörten Sehbedingungen zu einer Schwellenerhöhung um den Faktor 5 ($E_B = 0,6$ lx) bzw. 18 ($E_B = 1,8$ lx).

[BULLOUGH 2001] erwartete in seiner Arbeit zum Einfluss von Niederschlag auf die Sehleistung, dass Lichtsituationen mit niedrigem s/p -Verhältnis zu einer geringeren Beeinträchtigung der Sehaufgabe führen. In einer Laborstudie steuerten drei Versuchspersonen ein auf einem Monitor dargestelltes Sehobjekt, dessen Größe nicht beziffert ist, mit festem Kontrast auf einem virtuellen Rundkurs. Zur Operationalisierung der Detektionsleistung wurde die Fehlerrate verwendet, d. h. die relative Zeit innerhalb der sich das Objekt außerhalb der Straßenbegrenzung befand. Zwischen Monitor und Versuchsperson befand sich ein mit Wasser gefülltes Becken, durch das die Testpersonen hindurchschauten. Darin wurde mittels Luftblasen ein visuelles Rauschen zur Simulation von Niederschlag erzeugt (inverser Regen). Für normale (keine Luftblasen) und erschwerte Sehbedingungen wurden vier Lichtfarben (Rot, Gelb, Weiß und Blaugrün) bei jeweils drei verschiedenen Hintergrundleuchtdichten untersucht. Die Leuchtdichten bei normalen Bedingungen (0,03; 0,24; 2,0 cd/m²) unterschieden sich jedoch von denen bei erschwerten Sehbedingungen (0,15; 1,2; 10,0 cd/m²). Zur Beschreibung des spektralen Einflusses

nutzte BULLOUGH das s/p -Verhältnis, welches in Abhängigkeit des Leuchtdichteniveaus variierte. Relativ betrachtet wies Rot das niedrigste s/p -Verhältnis auf, Blaugrün das höchste. Die Farben Gelb und Weiß hatten ein ähnliches s/p -Verhältnis, welches zahlenmäßig zwischen dem von Rot und Blaugrün lag.

Bei niedrigen Hintergrundleuchtdichten führen erschwerte Sehbedingungen zu deutlich schlechteren Detektionsleistungen. Mit zunehmendem Leuchtdichteniveau steigt die Detektionsleistung in beiden Fällen, wobei der Unterschied zwischen normalen und erschwerten Sehbedingungen allmählich konvergiert. Ein signifikanter Einfluss der Lichtfarbe auf die Detektionsleistung konnte für beide Bedingungen nicht nachgewiesen werden. Dennoch zeigt sich, dass Lichtfarben mit einem höheren s/p -Verhältnis tendenziell zu einer Verbesserung der Sehleistung führen. Dieser Einfluss ist bei erschwerten Sehbedingungen wesentlich deutlicher ausgeprägt. Mit steigender Hintergrundleuchtdichte reduzieren sich jedoch die farbbedingten Einflüsse und konvergieren bei einer Leuchtdichte von $L \approx 65 \text{ cd/m}^2$ (erschwerte Sehbedingungen) bzw. $L \approx 5 \text{ cd/m}^2$ (normale Sehbedingungen).

[DAVOUDIAN 2014] führte eine Laborstudie zur physiologischen Blendung durch. Im Abstand von $a = 4 \text{ m}$ zum Beobachter stellte er mittels eines Projektors das achromatische Bild eines Straßenzuges dar. Zur Fixierung der Blickrichtung nutzte er einen foveal dargestellten Landoltring mit hohem Kontrast. Als Sehobjekt wurde die Silhouette eines Hundes ($\alpha_{\text{Obj}} = 0,70^\circ \times 0,55^\circ$) unter einem horizontalen Winkel von $\theta_{\text{Obj}} = \pm 7^\circ$ gezeigt. Landoltring und Sehobjekt wurden zeitgleich mit einer Dauer von $t_{\text{Obj}} = 650 \text{ ms}$ präsentiert. Als Blendquelle diente eine LED-Leuchte, die linksseitig des projizierten Straßenzuges positioniert wurde. Die Blendungsuntersuchung umfasste zwei Lichtfarben ($CCT = 3000 \text{ K}$; $s/p = 1,34$ und $CCT = 6000 \text{ K}$; $s/p = 1,97$) bei jeweils zwei unterschiedlichen Blendbeleuchtungsstärken (1; 2 lx). Zudem wurde die Größe der Blendquelle variiert ($\alpha_{\text{BQ}} = \{0,2^\circ; 0,8^\circ\}$). An der Untersuchung nahmen 42 Versuchspersonen teil.

Es konnten weder durch die Größenvariation der Blendquelle noch durch deren Lichtfarbe signifikante Einflüsse auf die Detektionsleistung gefunden werden. Bestätigt werden konnte allerdings die durch die Blendbeleuchtungsstärke hervorgerufene Wirkung. Dabei verfolgt DAVOUDIAN einen erwähnenswerten Ansatz. Er vergleicht die aus seiner Studie empirisch bestimmten, durch Blendung hervorgerufenen, Kontrastschwellenerhöhungen mit den effektiven Kontrastwerten. Die effektiven Kontrastwerte ergeben sich aus dem empirischen Formelwerk der physiologischen Blendung unter Anwendung der Blendbeleuchtungsstärke am Auge (vgl. Abschnitt 2.4.1). Hierfür hat DAVOUDIAN mit Hilfe einer neuartigen objektiven Erhebungsmethode die individuelle Streufunktion jeder Versuchsperson bestimmt und darauf basierend deren individuelle Schleierleuchtdichte berechnet. Die Gegenüberstellung von Kontrastschwelle und effektivem Kontrast zeigt, dass die im Versuch ermittelte Schwellenerhöhung deutlich geringer ausfällt. Die Anwendung des effektiven Kontrastes führt für den untersuchten Leuchtdichtebereich zu einer überschätzten Wirkung der Blendung.

[JAINSKI 1962] untersuchte an vier Personen den Einfluss der Lichtfarbe auf die Blendwirkung und ergänzte hiermit seine zuvor unter normalen Sehbedingungen durchgeführte Forschungsarbeit ([JAINSKI 1960]). In der aktuellen Studie verwendete er ebenfalls die Lichtfarben einer Glüh-, Leuchtstoff- und Natriumdampf Lampe sowie einer Quecksilberdampf Hochdrucklampe mit Leuchtstoff. Ein kreisförmiges, $\alpha_{\text{Obj}} = 1^\circ$ großes Sehobjekt wurde foveal in einem Abstand von $a = 2,3$ m dargeboten. Bei verschiedenen Hintergrundleuchtdichten im Bereich von $L = 0,017 \dots 51 \text{ cd/m}^2$ wurde die Unterschiedsschwelle für jede Lichtfarbe mit und ohne Blendwirkung bestimmt. Die Blendungsuntersuchung erfolgte jeweils mit sechs Blendbeleuchtungsstärken (0,5; 1,0; 3,0; 6,0; 10,0; 20,0 lx).

JAINSKI kann eine Abhängigkeit der Unterschiedsempfindlichkeit von der Blendbeleuchtungsstärke und dem Adaptationsniveau nachweisen. So steigt die Detektionsempfindlichkeit mit zunehmender Hintergrundleuchtdichte an. Bei konstanter Leuchtdichte vergrößert sich die Blendwirkung mit steigender Blendbeleuchtungsstärke. Dieser Einfluss reduziert sich jedoch mit steigendem Adaptationsniveau. Ein Einfluss der Lichtfarbe auf die Unterschiedsschwelle kann nicht nachgewiesen werden; jedoch zeigen die Untersuchungsdaten, dass sich die Readaptationszeiten nach der Blendwirkung in Abhängigkeit der Lichtfarbe voneinander unterscheiden. Bei gleichen Hintergrundleuchtdichten und Blendbeleuchtungsstärken führt das Licht der Glühlampe zu den längsten und das der Natriumdampf Lampe zu den kürzesten Readaptationszeiten.

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Studien sind mit ihren wichtigsten Untersuchungsparametern in Tabelle 3-2 zusammengefasst. Die mit ‚VP‘ bezeichnete Spalte enthält die Anzahl der an der jeweiligen Studie beteiligten Versuchspersonen. Die jeweils vorherrschenden Sehbedingungen sind in der Spalte ‚Sehbeding.‘ mit den Merkmalen Versuchsumfeld (statisch; dynamisch), Art der Objektbetrachtung (monokular; binokular), Beobachtungsentfernung (a) und Störgröße angegeben. Die Eigenschaften des adaptationsbestimmenden Feldes sind in den mit ‚Hintergrund‘ betitelten Spalten enthalten. Darin werden die mit ^{*)} versehenen Farben durch Verwendung einer HGL mit Filter(n) nachgebildet. Angaben zu dem Sehobjekt können den letzten beiden Spalten entnommen werden.

Tabelle 3-2: Studien zur Objektdetektion bei erschwerten Sehbedingungen.

Autor	VP	Sehbedng.	Hintergrund		Sehobjekt	
			LM/Farbe	L_{adapt} (cd/m ²)	θ_{Obj} (°)	LM/Farbe
[STADLER 1964]	1	statisch, binokular, $\alpha = 2,47$ m, Regen (mit und ohne Blendung)	GL	0,01 0,1 1,0 8,0	0	Projektor- lampe
[BULLOUGH 2001]	3	dynamisch, binokular, $\alpha < 0,5$ m Regen	Blaugrün ^{*)} Weiß ^{*)} Gelb ^{*)} Rot ^{*)}	Normal: 0,03 0,24 2,0 Erschw.: 0,15 1,2 10,0	nah- foveal	wie Hintergrd.
[DAVOUDIAN 2014]	42	statisch, binokular, $\alpha = 4,0$ m, Blendung	achroma- tisch	0,84	± 7	wie Hintergrd.
[JAINSKI 1962]	4	statisch, binokular, $\alpha = 2,3$ m, Blendung	GL NA LSL HgL + LS	0,017 ...51	0	wie Hintergrd.

3.3 Vergleich und Diskussion der Forschungsansätze

Für die Aufarbeitung des aktuellen Forschungsstandes zur Thematik wurden in den beiden vorausgehenden Abschnitten insgesamt 14 Laborstudien analysiert. Hiervon wurden 10 Untersuchungen bei normalen und 4 bei erschwerten Sehbedingungen durchgeführt, wobei sich bei letztgenannten jeweils zwei Studien der Störgröße Regen und zwei der Störgröße Blendung widmen. Nachfolgend werden zunächst die Ergebnisse der Studien miteinander verglichen und im Anschluss die in den Studien angewandten Methodiken diskutiert. Der letzte Teil dieses Abschnitts enthält die aus dem Grundlagenkapitel (vgl. Kapitel 2) und der Literaturanalyse abgeleiteten Erwartungen an die Versuchsvariablen dieser Arbeit sowie die daraus postulierten Forschungshypothesen.

3.3.1 Ergebnisse ausgewählter Studien zur Thematik

In allen hier vorgestellten Studien wird die Objektdetektion im Bereich mesopischer und niedrigphotopischer Leuchtdichten untersucht. Nach den klassischen Untersuchungen von [KÖNIG 1889] zur Kontrastempfindlichkeit des menschlichen Auges in Abhängigkeit

der Adaptationsleuchtdichte ist zu erwarten, dass für den in der Straßenbeleuchtung vorherrschenden Leuchtdichtebereich eine Reduktion der Kontrastschwelle mit ansteigender Adaptationsleuchtdichte auftritt, was gleichbedeutend mit einer verbesserten Detektionsleistung ist. Diese Erwartung wird weitestgehend durch die Ergebnisse von [LEWIS 1999], [FOTIOS 2009], [BLUMTRITT 2004], [FREIDING 2007], [BULLOUGH 2000], [LINGARD 2002], [ALFERDINCK 2006], [BULLOUGH 2001] und [JAINSKI 1962] bestätigt. Eine Ausnahme tritt bei [LEWIS 1999] im Fall der Metallhalogenlampe auf. Bei diesem Lampentyp reduziert sich die Detektionsleistung bei einer Zunahme der Adaptationsleuchtdichte von 0,1 auf 10,0 cd/m². Eine mögliche Erklärung hierfür ist die vergleichsweise hohe Energiedichte der Metallhalogenlampe im kurzwelligen Spektralbereich gegenüber den anderen im Versuch verwendeten Lampen. Bei niedrigen Adaptationsbedingungen sind vorwiegend die Stäbchen an der visuellen Wahrnehmung beteiligt, deren Aktivität durch Spektren mit einem höheren Anteil kurzwelliger Strahlungsleistung begünstigt wird (vgl. Abschnitt 2.1.1). Mit zunehmendem Leuchtdichteniveau verschiebt sich die maximale spektrale Empfindlichkeit des visuellen Apparates hin zu langwelligeren Strahlungsanteilen. Da alle von LEWIS verwendeten Lampen Strahlungsleistungen im mittleren, sichtbaren Spektralbereich aufweisen, kommt es zu einer vergleichbaren Anregung der beteiligten Rezeptoren, was sich in Form der konvergierenden Detektionsleistung ausdrückt.

Die Bedeutung der Objektgröße auf die Detektionsleistung lässt sich durch die sinkende Ortsauflösung des Auges zur Peripherie hin erklären, die einerseits durch die steigende Größe der rezeptiven Felder (vgl. Abschnitt 2.1) und, andererseits, durch die geringere Rezeptordichte (vgl. Abschnitt 2.1.1) verursacht wird. Die nachfolgende Diskussion bezieht sich ausschließlich auf die Studien bei normalen Sehbedingungen, da sich die Arbeiten zu erschwerten Sehbedingungen lediglich mit (nah-) fovealen Objektdarbietungen befassen und daher keine Aussagen über Wechselwirkungen zwischen Störgröße und peripherer Objektposition ermöglichen.

Insgesamt untersuchten sechs der unter Normalbedingungen durchgeführten Studien den Einfluss verschiedener, peripher dargebotener Objekte auf die Detektionsleistung. Die darin verwendeten Sehobjektgrößen unterschieden sich jedoch teilweise deutlich voneinander. So verwenden [GREULE 1985] ($\alpha_{\text{Obj}} = 20'$), [FLECK 1988] ($\alpha_{\text{Obj}} = 27' \times 48'$) und [BLUMTRITT 2004] ($\alpha_{\text{Obj}} = 10'$) Sehobjekte in einem ähnlichen Größenbereich, der nahezu der in der Straßenbeleuchtung typischerweise verwendeten Objektgröße (vgl. Abschnitt 2.3) entspricht. Aus den Arbeiten von [GREULE 1985] und [FLECK 1988] geht hervor, dass die Erhöhung des Peripheriewinkels zu einer Erhöhung der Kontrastschwelle führt, was wiederum einer Reduktion der Detektionsleistung entspricht. Die Ergebnisse von [BLUMTRITT 2004] folgen dieser Erkenntnis deutlich. Die nachgewiesene Verminderung der Detektionsleistung lässt sich mit der obigen Beschreibung der zur Peripherie hin sinkenden Ortsauflösung des Auges deuten.

Tendenziell vergleichbar, aber weniger deutlich sind dagegen die Ergebnisse von [LINGARD 2002] ($\alpha_{\text{Obj}} = 2^\circ$) und [ALFERDINCK 2006] ($\alpha_{\text{Obj}} = 2^\circ$). In beiden Studien kommt es

lediglich bei den äußersten Objektpositionen (größte Exzentrizität) zu einer Abnahme der Objektdetektion, während für jeweils kleinere Peripheriewinkel keine Unterschiede in der Detektionsleistung festgestellt werden konnten. Im direkten Vergleich beider Studien ist dieses Ergebnis insofern diskutabel, als das die Winkelbereiche und folglich auch der jeweils höchste Peripheriewinkel unterschiedlich groß sind ($\theta_{\text{Obj.max,ALFERDINCK}} = \pm 15^\circ$, $\theta_{\text{Obj.max,LINGARD}} = \pm 29^\circ$). Im Vergleich zu den Arbeiten von [GREULE 1985], [FLECK 1988] und [BLUMTRITT 2004] ist zu vermuten, dass das weniger deutliche Ergebnis eine Folge der erheblich größeren Sehobjekte ist.

Lediglich [FOTIOS 2009] kommt zu widersprüchlichen Ergebnissen. Zwar führt der Unterschied vom fovealen Objekt (0°) zum nächstgelegenen peripheren Sehobjekt ($+14,8^\circ$) zunächst einheitlich zu einer Verringerung der Detektionsleistung. Anschließend kommt es jedoch von Objektposition 2 ($+14,8^\circ$) zu Objektposition 3 ($+27,9^\circ$) tendenziell zu einer Verbesserung der Detektionsleistung, die teilweise sogar die Detektionsleistung bei fovealer Objektdarbietung übersteigt. Von Objektposition 3 zu 4 ($+42,0^\circ$) kommt es für das geringste Beleuchtungsniveau wiederum zu einer weiteren Verbesserung, während sich bei den beiden höheren Beleuchtungsniveaus eher eine erneute Reduzierung der Erkennbarkeit abzeichnet. Es ist denkbar, dass die Fluktuation der Detektionsleistung in Abhängigkeit der Objektposition durch die variable Objektgröße, die sich in einem Bereich von schätzungsweise $(0,03^\circ \dots 0,63^\circ) \times 7^\circ$ bzw. $(1,8' \dots 37,8') \times 420'$ bewegt, hervorgerufen wird.

Zum Einfluss der Lichtfarbe auf die Objekterkennung zeigen die Untersuchungen von [LEWIS 1999], [FOTIOS 2009], [FREIDING 2007], [LINGARD 2002] und [ALFERDINCK 2006] eine verbesserte Detektionsleistung bei höherem Anteil kurzwelliger Strahlungsanteile respektive höherem s/p -Verhältnis. Dieser Einfluss ist für Adaptationsleuchtdichten bis $1,0 \text{ cd/m}^2$ signifikant und verschwindet mit weiter ansteigendem Adaptationsniveau. [BULLOUGH 2000] kann sogar bis zu einem Leuchtdichteniveau von $3,0 \text{ cd/m}^2$ signifikante Vorteile bei höherem s/p -Verhältnis nachweisen. Diese Resultate lassen sich damit erklären, dass der Sehprozess bei niedrigen Leuchtdichten vermehrt durch die Stäbchen getragen wird, deren maximale Empfindlichkeit im kurzwelligen Bereich des sichtbaren Spektrums liegt (vgl. Abschnitt 2.1.1). Demnach führen Lichtfarben mit einem geringeren Strahlungsanteil in diesem Bereich zu einer weniger starken Anregung der Rezeptoren, wodurch die Effizienz der Beleuchtungssituation im Hinblick auf die Detektionsleistung sinkt. Im Widerspruch dazu stehen die Ergebnisse von [BLUMTRITT 2004], denen zufolge eine verbesserte Sehleistung bei höheren Anteilen langwelliger Strahlung erreicht wurde. BLUMTRITT begründet seine Ergebnisse mit verschiedenen Adaptationszuständen seiner Versuchspersonen bei den untersuchten Lichtfarben. Die messtechnische Bewertung mittels der photopischen Hellempfindlichkeitskurve führt bei mesopischen Bedingungen zu einer Unterschätzung kurzwelliger Strahlungsanteile (vgl. Abschnitt 1.1). Demnach werden Adaptationsniveaus bei Bewertungsfeldern mit einem höheren Anteil kurzwelliger Strahlung messtechnisch unterbewertet, so dass sich für derartige Situationen

höhere Adaptationszustände bei den Beobachtern einstellen. Diese bewirken wiederum eine Empfindlichkeitsreduktion der Stäbchen, wodurch Lichtfarben mit einem höheren kurzwelligen Strahlungsanteil den Sehapparat weniger stark anregen. [JAINSKI 1960] erreicht ebenfalls eine verbesserte Detektionsleistung bei Leuchtdichten $< 1,0 \text{ cd/m}^2$ für das Licht einer Leuchtstofflampe. Leider sind in diesem Zusammenhang keine Informationen zur spektralen Zusammensetzung der verwendeten Lichtquellen gegeben.

Weniger deutlich wird die Wechselwirkung zwischen der Lichtfarbe und der Berücksichtigung verschiedener Objektpositionen. [BLUMTRITT 2004] zeigt in seiner Studie, dass sich der spektrale Einfluss mit zunehmendem Peripheriewinkel vergrößert. Dieses Ergebnis stützt seine obige Erklärung zu den verschiedenen Adaptationszuständen, da sich die kumulierte Anzahl der Stäbchen mit zunehmender Exzentrizität erhöht. Demgegenüber stehen die Daten von [LINGARD 2002], der keinen signifikanten Einfluss von Farbe und Objektposition hat finden können. Bei [ALFERDINCK 2006] zeigt sich lediglich für Rot eine signifikante Leistungsreduktion bei größtem Peripheriewinkel und einem Leuchtdichtenniveau von $0,1 \text{ cd/m}^2$. [FOTIOS 2009] trifft in seiner Ergebnisdarstellung keine Aussagen zur Wechselwirkung von Lichtfarbe und Objektposition.

[BULLOUGH 2001] kann bei seiner Untersuchung mit Regennachbildung tendenziell verbesserte Sehleistungen bei höherem s/p -Verhältnis nachweisen. Auch hier reduziert sich der Einfluss der Lichtfarbe mit steigender Adaptationsleuchtdichte und verschwindet bei etwa 65 cd/m^2 . Hingegen konvergieren die bei verschiedenen Lichtfarben unter normalen Sehbedingungen bestimmten Sehleistungen bereits bei etwa 5 cd/m^2 . Den Unterschied zwischen den Leuchtdichten bei Konvergenz unter normalen und erschwerten Bedingungen führt BULLOUGH ebenfalls auf die Beteiligung der Stäbchen zurück, die bei dynamischen Umweltbedingungen (vgl. Abschnitt 2.4.2) wesentlich empfindlicher reagieren und daher auch bei höheren Leuchtdichten noch zur Wahrnehmung beitragen.

Hinsichtlich der Wechselwirkung zwischen Farbe und physiologischer Blendwirkung kann [JAINSKI 1962] keine Einflüsse nachweisen. Jedoch berichtet JAINSKI von unterschiedlichen Readaptationszeiten in Abhängigkeit des verwendeten Leuchtmittels. Leider liegen auch in diesem Fall keine spektralen Informationen vor.

3.3.2 Methodiken ausgewählter Studien zur Thematik

Bei den analysierten Forschungsarbeiten handelt es sich um Laborstudien mit vorwiegend kleinem Stichprobenumfang. Die Hälfte der Arbeiten berücksichtigte weniger als 10 Versuchspersonen, so dass die Aussagekraft der hieraus resultierenden Ergebnisse kritisch zu werten ist.

Vier der Studien ([BULLOUGH 2000], [LINGARD 2002], [ALFERDINCK 2006], [BULLOUGH 2001]) verwendeten eine dynamische Sehaufgabe, bei der eine abstrahierte Fahrsimulation auf einem virtuellen Rundkurs unter binokularer Betrachtung absolviert wurde. Dies hat den Vorteil, dass eine sehr praxisnahe Sehaufgabe durchgeführt wurde. Nachteilig hierbei ist,

dass diese Form der Sehaufgabe ein gewisses Maß an Computerspielerfahrung seitens der Versuchspersonen erfordert. Ebenso wird von [LINGARD 2002] berichtet, dass die Dynamik der Sehaufgabe teilweise zu einer Änderung des Objekthintergrundes und folglich zu einer Veränderung des Sehobjektkontrastes führte, wodurch eine ungewollte Beeinträchtigung der Detektionsleistung erfolgte.

Von den statischen Forschungsansätzen wurden drei bei monokularer Betrachtung durchgeführt ([LEWIS 1999], [FOTIOS 2009], [BLUMTRITT 2004]); eine Betrachtungsweise, die nicht zwangsläufig eine praxisnahe Sehsituation abbildet. Zudem ist bei der von [FOTIOS 2009] verwendeten Methodik, die Darbietungsdauer über mechanische Blenden zu realisieren, von dauerhaft alternierenden Akkommodationseinstellungen (zwischen Blende und Sehobjekt) der Testpersonen auszugehen. Da Akkommodationsänderungen bei geringen Helligkeitsniveaus deutlich verlangsamt ablaufen (vgl. Abschnitt 2.1.2), ist anzunehmen, dass bei den kurzen Darbietungszeiten der Sehobjekte ($t_{\text{Obj}} = 300 \text{ ms}$) keine ausreichende Akkommodation auf das Sehobjekt erreicht werden konnte.

Die Ausprägungen der Untersuchungsparameter Adaptationsniveau und Lichtfarbe entsprechen weitestgehend den in der Straßenbeleuchtungspraxis typischen Größenverhältnissen. Hingegen übersteigt die Größe der Sehobjekte in den meisten Fällen den klassischen Anwendungsbereich von $\alpha_{\text{Obj}} \approx 10'$ (vgl. Abschnitt 2.3). Lediglich die Studie von [BLUMTRITT 2004] entspricht der in der Praxis verwendeten Sehobjektgröße. Erwähnenswert ist die Studie von [FOTIOS 2009], bei der die Objektgröße aufgrund der durchgeführten Operationalisierung zur Schwellenbestimmung bewusst variiert und damit die Unschärfe der in dieser Arbeit bestimmten Schwellen vergrößert wird.

Ebenso verwenden nur wenige Studien einen ausreichend großen Abstand zwischen Beobachter und Sehobjekt. Einzig in den Studien von [BULLOUGH 2000], [ALFERDINCK 2006] und [DAVOUDIAN 2014] betrugen die Beobachtungsentfernungen jeweils mehr als 3 m, so dass hier näherungsweise von einer praxisnahen Sehsituation mit fernakkommodiertem Auge (vgl. Abschnitt 2.1.2) ausgegangen werden kann.

Bei den Studien mit erschwerten Sehbedingungen ist die Umsetzung der Methodik der Regendarstellung kritisch zu hinterfragen. So fehlt bei dem von [STADLER 1964] mit Klarlacktropfen auf einer Scheibe abstrahierten Regenereignis gänzlich die Dynamik im Gesichtsfeld. An dieser Stelle sei auf die Diskussion bei [BULLOUGH 2001] verwiesen. Demnach ist das Antwortverhalten der Stäbchen deutlich ausgeprägter, wenn das extrafoveale Sehfeld einer Dynamik unterliegt. BULLOUGH stützt sich in diesem Zusammenhang auf die Studien von [BREITMEYER 1990], [STABELL 1981] sowie [REEVES 1986], in denen gezeigt wurde, dass die Stäbchen noch weit oberhalb von $L_{\text{adapt}} = 3 \text{ cd/m}^2$ aktiv sind, sofern die Peripherie dynamische Stimuli enthält. Die von [BULLOUGH 2001] selbst durchgeführte Untersuchung bildet das Regenereignis in inverser Form ab. Mit Luftblasen in einem Aquarium wird zwar eine Dynamik im Gesichtsfeld erzeugt, deren Vergleichbarkeit mit einer realen Regensituation kann jedoch nicht abschließend geklärt werden.

Zusammenfassend liefert keine von den recherchierten und hier vorgestellten Untersuchungen einen zufriedenstellenden Forschungsansatz, mit dem die in der Straßenbeleuchtung typische Sehaufgabe bei annähernd praxisähnlichen Sehbedingungen wiedergegeben wird. So ist entweder der Beobachtungsabstand zu gering gewählt, das Sehobjekt unverhältnismäßig groß oder es wird lediglich eine Objektposition untersucht. Ebenso ist in einigen der diskutierten Arbeiten eine direkte Rückführung der abhängigen Größe auf die unabhängigen Variablen nicht möglich, weil entweder Farbkontraste zwischen dem Sehobjekt und seinem Hintergrund auftreten ([BLUMTRITT 2004], [FREIDING 2007], [LINGARD 2002]), die Größe des Sehobjektes variiert ([FOTIOS 2009]), oder die Dynamisierung der Sehaufgabe teilweise zu kurzzeitigen Kontrastveränderungen führt ([LINGARD 2002]).

Daher besteht der Wunsch, die Einflüsse von Adaptationsleuchtdichte, adaptationsbestimmender Lichtfarbe und Objektposition auf die Detektionsleistung auf einer miteinander vergleichbaren Basis bei einer für die Straßenbeleuchtungspraxis typischen Sehaufgabe zu untersuchen. In Erweiterung zu bisherigen Studien soll einerseits eine direkte Vergleichbarkeit zwischen normalen und erschwerten Sehbedingungen möglich sein. Andererseits soll mit der Wahl geeigneter Farbtemperaturen auch das zunehmende Aufkommen von LED-Leuchtmitteln (vgl. Abschnitt 1.1) berücksichtigt werden. Eine Laboruntersuchung zur Absolutschwellenmessung mit derartigen Anforderungen konnte bei der Analyse der wissenschaftlichen Literatur nicht gefunden werden.

3.3.3 Erwartungen und Forschungshypothesen

Aus der Forschungsfrage (vgl. Abschnitt 1.2) ergeben sich die, bezüglich der Detektionsleistung zu untersuchenden, Einflussgrößen ‚Adaptationsleuchtdichte‘, ‚Lichtfarbe‘, ‚Objektposition‘ und ‚Sehbedingung‘. Die zu erwarteten Wirkungen der Einflussgrößen werden im Folgenden sukzessiv unter Anwendung des bisher erarbeiteten Kenntnisstandes abgeleitet und in Form von Hypothesen (H) postuliert. Zur eindeutigen Kennzeichnung werden die Hypothesen mit einer fortlaufenden Nummerierung versehen.

Für den Einfluss der Adaptationsleuchtdichte wird erwartet, dass sich die Leuchtdichteschwelle mit steigendem Adaptationsniveau erhöht (H1). Dieser Zusammenhang begründet sich auf dem psychophysischen ‚Gesetz‘ nach WEBER und FECHNER. Demnach ist die Differenzschwelle (hier: Leuchtdichteunterschied zwischen Reiz und Hintergrund) proportional zum Standardreiz (hier: Adaptationsleuchtdichte) [GOLDSTEIN 2002].

Bei der Variation der Objektposition wird erwartet, dass sich die Erkennbarkeit eines Sehobjektes konstanter Größe mit zunehmendem Abstand von der zentralen Sehachse verschlechtert. Dies ist gleichbedeutend mit einem Anstieg der Leuchtdichteschwelle bei gleichzeitig steigendem Objektwinkel (H2). Die Ursache liegt in der Abnahme der Rezeptordichte (vgl. Abschnitt 2.1.1) und dem Anstieg der Größe der rezeptiven Felder zur

Peripherie hin (vgl. Abschnitt 2.1), wodurch das Objekt zunehmend unschärfer erscheint. Die mit der Unschärfe einhergehende Aufweichung der Kantenübergänge zwischen Objekt und Hintergrund reduziert die Wirkung der simultanen Kontrastverstärkung und erschwert hierdurch die Objekterkennung.

Der Einfluss der Lichtfarbe wird in Zusammenhang mit der Adaptationsleuchtdichte betrachtet. Es wird angenommen, dass sich der Einfluss der adaptationsbestimmenden Lichtfarbe mit Zunahme des Adaptationsniveaus reduziert (H3). Als Erklärung wird die mit steigendem Helligkeitsniveau zunehmende Beteiligung der Zapfen am Sehprozess angeführt (vgl. Abschnitt 2.1.1). Die dem Zapfensehen zugrundeliegenden drei Rezeptortypen haben unterschiedliche spektrale Empfindlichkeiten, die jeweils einen begrenzten Wellenlängenbereich des sichtbaren Spektrums abdecken und hierdurch die Differenzierung von Farben ermöglichen. Somit werden je nach Lichtfarbe verschiedene Empfänger unterschiedlich stark angeregt. Die bei niedrigen Leuchtdichten zunehmend aktiven Stäbchen sind gegenüber den einzelnen Zapfen breitbandiger und absorbieren das Licht des gesamten sichtbaren Spektrums. Infolgedessen liegt beim Stäbchensehen lediglich eine maximale Strahlungsempfindlichkeit vor, die sich im kurzwelligen Wellenlängenbereich des sichtbaren Spektrums befindet. Es ist daher davon auszugehen, dass adaptationsbestimmende Lichtfarben, deren Strahlungsanteile vorwiegend im Bereich dieses Maximums liegen, das Sehsystem effizienter anregen und damit zu einer Verringerung der Leuchtdichteschwelle führen (H4). Eine zur Hypothese H4 vergleichbare Vermutung wird auch für den Einfluss der Objektposition aufgestellt. Bedingt durch die retinale Rezeptorverteilung werden peripher dargebotene Objekte auf Netzhautbereichen abgebildet, die mit steigendem Exzentrizitätswinkel vorwiegend von Stäbchen besiedelt sind (vgl. Abschnitt 2.1.1). In der logischen Konsequenz führen adaptationsbestimmende Lichtfarben mit einem höheren Anteil kurzwelliger Strahlung im sichtbaren Spektrum zu einer stärkeren Aktivierung der Stäbchen und damit zu einer verbesserten Erkennbarkeit von Objekten (H5).

Für die Störgröße Regen wird postuliert, dass ein auftretendes Regenereignis zu einer Anhebung der Detektionsschwelle führt (H6). Die Erklärung ergibt sich aus der Betrachtung zur Extinktion, die durch Wechselwirkung zwischen Licht und Regentropfen verursacht wird (vgl. Abschnitt 2.4.2). Die dabei auftretenden Streuungserscheinungen variieren u. a. in Abhängigkeit der Tropfengröße. Es wird daher eine weitere Differenzierung zur Wirkung der Einflussgröße Regen vorgenommen. Entsprechend der im Grundlagenkapitel geführten Beschreibung zur Streuung wird angenommen, dass bei kleineren Tropfendurchmessern der Anteil der Vorwärtsstreuung geringer ist. In der Folge wird bei derartigen Regenereignissen eine stärkere extraokulare Verschleierung erwartet, die zur Verschlechterung der Objektdetektion führt (H7). Neben der Teilchengröße ist die Stärke der Streuung auch von der Wellenlänge des Lichts abhängig. Es wird daher vermutet, dass der resultierende Schleier umso größer ist, je größer die kurzwelligen Strahlungsanteile

der adaptationsbestimmenden Lichtfarbe, was gleichbedeutend mit einer höheren ähnlichsten Farbtemperatur ist, und je kleiner die Tropfendurchmesser des Regenereignisses sind (H8).

Die Ursache physiologischer Blendung lässt sich auf eine Schleierleuchtdichte zurückführen (vgl. Abschnitt 2.4.1), die eine Anhebung der Leuchtdichteschwelle bewirkt (H9). Durch die bei mesopischen Verhältnissen einsetzende PURKINJE-Verschiebung und die damit einhergehende Verlagerung der spektralen Hellempfindlichkeit hin zu kürzeren Wellenlängen (vgl. Abschnitt 2.1.1) wird erwartet, dass der visuelle Apparat empfindlicher gegenüber Beleuchtungssituationen mit höherer (ähnlichster) Farbtemperatur reagiert. Demnach wird angenommen, dass sich die physiologische Blendwirkung mit ansteigender ähnlichster Farbtemperatur der adaptationsbestimmenden Lichtfarbe ebenfalls erhöht (H10). Dabei sei festgelegt, dass Blendquellen und Adaptationsfeld gleiche Farbtemperaturen haben, um Farbkontraste zu vermeiden.

Aus der logischen Konsequenz der Hypothesen H6 und H9 ist für das kombinierte Auftreten von Regen und Blendung ebenfalls eine Schwellenerhöhung zu erwarten. Dabei wird angenommen, dass die Schwellenerhöhung umso größer ist, je kleiner der Durchmesser der Regentropfen ist (H11). Als Begründung wird die höhere Tropfendichte von Regenereignissen mit kleinerem Durchmesser angeführt, die Mehrfachstreuungen begünstigt (vgl. Abschnitt 2.4.2). Demnach wird das Licht der Blendquellen stärker gestreut und es kommt zu einer Anhebung des extraokularen Schleiers.

In der nebenstehenden Tabelle 3-3 wird eine Zusammenfassung der Forschungshypothesen dieser Arbeit gegeben. Die darin enthaltene Trennlinie grenzt die Hypothesen für normale Sehbedingungen von denen für erschwerte Bedingungen ab.

Tabelle 3-3: Forschungshypothesen.

Kürzel	Formulierter Zusammenhang
H1	Mit zunehmender Adaptationsleuchtdichte steigt die Leuchtdichteschwelle an.
H2	Mit zunehmendem Objektwinkel steigt die Leuchtdichteschwelle an.
H3	Mit zunehmender Adaptationsleuchtdichte reduziert sich der Einfluss der adaptationsbestimmenden Lichtfarbe auf die Leuchtdichteschwelle.
H4	Bei abnehmender Adaptationsleuchtdichte führen adaptationsbestimmende Lichtfarben mit einem höheren Anteil kurzwelliger Strahlung zu einer Verringerung der Leuchtdichteschwelle.
H5	Bei zunehmendem Objektwinkel führen adaptationsbestimmende Lichtfarben mit einem höheren Anteil kurzwelliger Strahlung zu einer Verringerung der Leuchtdichteschwelle.
H6	Das Auftreten eines Regenereignisses führt extinktionsbedingt zu einer Erhöhung der Detektionsschwelle.
H7	Bei kleiner werdendem Regentropfendurchmesser erhöht sich die Leuchtdichteschwelle von Objekten gleicher Position im Gesichtsfeld.
H8	Bei kleiner werdendem Regentropfendurchmesser führen adaptationsbestimmende Lichtfarben mit höherer Farbtemperatur zu einer Erhöhung der Leuchtdichteschwelle von Objekten gleicher Position im Gesichtsfeld.
H9	Durch Blendung erhöht sich die Leuchtdichteschwelle von Objekten gleicher Position im Gesichtsfeld.
H10	Je höher die ähnlichste Farbtemperatur der adaptationsbestimmenden Lichtfarbe, desto größer ist die durch eine Blendquelle gleicher Lichtfarbe hervorgerufene Erhöhung der Leuchtdichteschwelle eines Objektes an gleicher Position.
H11	Je kleiner der Regentropfendurchmesser, desto stärker ist die durch die Blendquelle hervorgerufene Blendungserscheinung.

Kapitel 4 Methodik und Versuchsbeschreibung

Im Anwendungsbereich der ortsfesten Straßenbeleuchtung ist der Einfluss der Lichtfarbe auf die Objektdetektion bei normalen und erschwerten Sehbedingungen zu untersuchen. Das hierfür benötigte methodische und experimentelle Vorgehen ist Bestandteil dieses Kapitels. Im ersten Abschnitt werden die Versuchsvariablen und deren Ausprägungen definiert. Das konzeptionelle Vorgehen zur Untersuchung der empirischen Fragestellung wird mit dem in Abschnitt 4.2 aufgestellten Versuchsplan festgelegt. Dabei werden auch Anforderungen an die Versuchsausrüstung abgeleitet, deren technische Umsetzung und messtechnische Validierung im nachfolgenden Abschnitt 4.3 erläutert wird. Das an den Untersuchungen teilhabende Probandenkollektiv sowie die durchgeführte Eignungsfeststellung werden in Abschnitt 4.4 beschrieben. Im anschließenden Abschnitt 4.5 werden das Vorgehen der Datenerhebung und die Versuchsbedingungen vorgestellt. Die Auswertung der in den Versuchen erhobenen Daten ist Bestandteil von Abschnitt 4.6. Zur Abschätzung der Datenqualität wird im letzten Abschnitt eine Betrachtung der Fehler- und Messunsicherheiten durchgeführt.

4.1 Versuchsvariablen

Die Objektdetektion ist die abhängige Variable (AV) der Untersuchung und wird durch die Leuchtdichteunterschiedsschwelle (ΔL_{th}) zwischen Sehobjekt und Hintergrund, kurz Leuchtdichteschwelle, operationalisiert. Sie entspricht dem benötigten Leuchtdichteunterschied, bei dem das Objekt in 50 % der gezeigten Fälle ($p_{th} = 0,5$) erkannt wird. Zu den unabhängigen Variablen (UV) gehören die adaptionsbestimmende Leuchtdichte (L_{adapt}) und Lichtfarbe (φ_{adapt}), welche sich im Versuch auf das Bewertungsfeld beziehen, die Objektposition (θ_{Obj}), welche die Lage des Sehobjektes bezüglich der fovealen Blickrichtung (vgl. Abbildung 2-2) angibt, sowie die Regenart (R) und die Blendung (B). Eine Zusammenfassung der Versuchsvariablen wird in Tabelle 4-1 gegeben. Darin enthalten sind auch die Ausprägungen, deren Auswahl nachfolgend begründet wird.

Die Festlegung der zu untersuchenden Adaptionsleuchtdichten orientiert sich an den mittleren Fahrbahnleuchtdichten der ME-Beleuchtungsklassen nach [DIN EN 13201-2]. Das gewählte niedrigste Niveau von $L_{adapt} = 0,3 \text{ cd/m}^2$ entspricht der normativen Vorgabe für die unterste Beleuchtungsklasse ME6. Mit dem Niveau von $L_{adapt} = 1,0 \text{ cd/m}^2$

wird die ME3-Klasse erfasst, die in der Praxis weit verbreitet ist. Das Adaptationsniveau von $L_{\text{adapt}} = 3,0 \text{ cd/m}^2$ übersteigt den für die höchste Beleuchtungsklasse ME1 geforderten Wert von $L_{\text{adapt}} = 2,0 \text{ cd/m}^2$. Es ist damit für die Straßenbeleuchtung eher untypisch, wird aber zum Vergleich mit bisherigen Studien in der Untersuchung berücksichtigt.

Bei der Lichtfarbe wurden mit 2500 K, 4000 K und 6000 K drei ähnlichste Farbtemperaturen (CCT) gewählt, die den Farbbereich von konventionellen Leuchtmitteln (Natriumdampfhochdrucklampen, Halogenmetalllampen) und Weißlicht-LEDs weitestgehend berücksichtigen. Die Lichtfarbe Mint lässt sich zwar als grünstichiges Weiß beschreiben, ihr Farbort liegt jedoch nicht mehr im Judd'schen Bereich, der eine Quantifizierung mit einer ähnlichsten Farbtemperaturwert erlaubt. Diese Lichtfarbe dient als Erweiterung zu bisherigen Studien. Ihr Interesse begründet sich durch die PURKINJE-Verschiebung, die bei mesopischen Bedingungen zu einer gesteigerten Hellempfindlichkeit im grünlichen Spektralbereich führt. Eine eindeutige Beschreibung der ausgewählten Lichtfarben mit den Farbwertanteilen (x_{CIE} , y_{CIE}) des CIE-Normvalenzsystems ist in Tabelle 4-4 (vgl. Abschnitt 4.3.3) gegeben.

Die Auswahl der Objektwinkel nimmt sich dem Wunsch nach Untersuchungen zur peripheren Objektdetektion an (vgl. Abschnitt 2.3). So werden mit den Positionen $\theta_{\text{Obj}} = \pm 10^\circ$ und $\theta_{\text{Obj}} = \pm 20^\circ$ zwei Winkelbereiche untersucht, bei denen überwiegend die Stäbchen angeregt werden (vgl. Abschnitt 2.1.1). Um Aussagen über die Leistung der Zapfen treffen zu können, werden mit $\theta_{\text{Obj}} = \pm 2^\circ$ nahfoveale Positionen berücksichtigt.

Zur Untersuchung erschwerter Bedingungen wurden mit ‚Starkregen‘ und ‚Sprühregen‘ zwei Regenereignisse festgelegt, anhand derer verschiedene Tropfendurchmesser erprobt werden können. Für die physiologische Blendung wird mit der Schwellenerhöhung von $TI = 20 \%$ der normativ zugelassene Höchstwert angesetzt, wodurch die ungünstigsten Blendungsbedingungen der Straßenbeleuchtungspraxis wiedergegeben werden.

Tabelle 4-1: Übersicht der Versuchsvariablen.

Variable	Typ	Ausprägung
ΔL_{th}	AV	---
L_{adapt}	UV	0,3 cd/m ² ; 1,0 cd/m ² ; 3,0 cd/m ²
φ_{adapt}	UV	2500 K; 4000 K; 6000 K; Mint
θ_{Obj}	UV	-20°; -10°; -2°; +2°; +10°; +20°
R	UV	Starkregen (Rst); Sprühregen (Rsp)
B	UV	$TI = 20 \%$

4.2 Versuchsplan

Ziel dieser Planung ist die sorgfältige Vorstrukturierung der Untersuchungen, um Fehler und Missstände während der eigentlichen Durchführung zu verhindern [BORTZ 1993]. Diese Arbeit sieht einen hypothesenprüfenden Ansatz vor, der ein Laborexperiment mit

Messwiederholung verwendet. Die Untersuchung im Labor ermöglicht die gezielte Variablenisolation, die weitgehende Kontrolle von Sekundärvarianzen (systematische Störvariablen) sowie die Minimierung von Fehlervarianzen (unsystematische Störvariablen), wodurch ein hohes Maß an interner Validität erreicht wird. Messwiederholung bedeutet, dass die abhängige Variable mehrfach erhoben wird, indem dasselbe Probandenkollektiv alle Versuchsreihen durchläuft (vgl. Abschnitt 4.5). Hierdurch werden die intraindividuellen Unterschiede im Mittel konstant gehalten, wodurch sich der benötigte Umfang der Stichprobe reduziert. Zur Minimierung möglicher Lerneffekte und zur Vermeidung gegenseitiger Abhängigkeiten ist die Reihenfolge der Versuche zu randomisieren.

Nachfolgend werden auf die Sehaufgabe, die zu deren Durchführung benötigte Versuchsumgebung sowie die Methode zur Schwellenbestimmung eingegangen.

4.2.1 Sehaufgabe

Der Untersuchung liegt die in Abschnitt 2.3 beschriebene, allgemein anerkannte Sehaufgabe der Straßenbeleuchtung zugrunde. Das Bewertungsfeld, d. h. das Objektfeld, wird durch eine homogene Fläche abstrahiert, die aufgrund ihrer räumlichen Ausdehnung zugleich als adaptationsbestimmendes Feld dient (vgl. Abschnitt 2.2). Für die Quantifizierung der Homogenität wird die Gesamtgleichmäßigkeit (U_0) herangezogen (vgl. Abschnitt 1.1), die sich in Anlehnung an [DIN EN 13201-2] aus dem Verhältnis von minimaler zu mittlerer Leuchtdichte innerhalb des Bewertungsfelds ergibt.

Der Abstand zwischen Beobachter und Beobachtungsebene soll mindestens $a = 4$ m (0,25 dpt) betragen, um die natürlichen Akkommodationsbedingungen für die Ferne (0 dpt) näherungsweise nachbilden zu können (vgl. Abschnitt 2.1.2).

Das Sehobjekt ist quadratisch ausgeführt und soll für den geforderten Beobachtungsabstand eine Größe von $\alpha_{\text{Obj}} \approx 11'$ aufweisen. Dies entspricht der Größe des De-facto-Standard Sehobjekts (vgl. Abschnitt 2.3) in etwa 62,5 m Entfernung. Die Erkennbarkeit des Objektes ergibt sich aus der Differenz zwischen seiner und der Umgebungsleuchtdichte. Aufgrund der im nächtlichen Straßenverkehr vorherrschenden mesopischen Bedingungen sind Farbkontraste gegenüber dem Helligkeitskontrast von geringerer Bedeutung und werden daher in dieser Arbeit nicht berücksichtigt (vgl. [ADRIAN 1989]). Für den Versuch wird der Positivkontrast festgelegt, da dieser gegenüber dem Negativkontrast eine schlechtere Erkennbarkeit beinhaltet und damit den ungünstigeren Fall darstellt [AULHORN 1964]. Die Darbietungszeit des Sehobjektes wird auf $t_{\text{Obj}} = 200$ ms festgelegt und entspricht damit der minimalen Beobachtungszeit in der Praxis (vgl. Abschnitt 2.3).

Die Sehaufgabe wird binokular durchgeführt, da dies einer realitätsnahen Betrachtungsweise entspricht. Gemäß den Ausführungen von [CAMPBELL 1965] ist zu erwarten, dass gegenüber monokularer Beobachtung geringere Schwellen auftreten. Zur Einhaltung der Winkelverhältnisse zwischen Blickrichtung und den zu untersuchenden Objektpositionen wird ein Fixationspunkt verwendet, der zugleich einen kontrastreichen Anreiz für die Akkommodationseinstellung bildet.

4.2.2 Versuchsumgebung

Es wird eine virtuelle Versuchsumgebung gewählt, bei der die Sehaufgabe mit einem Digitalprojektor auf einer Projektionswand (Leinwand) dargestellt wird. Für jede Versuchssituation wird ein virtuelles Bild (Versuchsbild) generiert, welches Adaptationsfeld, Sehobjekt und Fixationspunkt enthält. Mit dieser Darbietungsform wird eine hohe Reproduzierbarkeit der Versuchsbedingungen gewährleistet. So werden durch die gleichzeitige Darstellung von Umfeld und Testreiz betriebsbedingte Schwankungen des Projektorleuchtmittels relativiert, wodurch der Leuchtdichteunterschied zwischen dem Sehobjekt und seiner Umgebung konstant gehalten wird. Ebenfalls ermöglicht die Darstellung von Fixationspunkt und Sehobjekt in einem Bild die Einhaltung konstanter Winkelbezüge der zu untersuchenden Objektpositionen. Zudem wird spektrale Gleichheit gewährleistet. Auch werden, im Gegensatz zu mechanischen Realisierungen, keine Trag- und Anschlagmittel sowie dauerhaft bestehende Positionsmarken benötigt, die zu Störstellen im Adaptationsfeld und damit zu Inhomogenitäten führen.

Für die Regenuntersuchung wird eine Beregnungsanlage mit einem geschlossenen Wasserkreislauf konzipiert. Die Anlage sieht zwei voneinander getrennte Regenkreise vor, um die beiden Regenarten Stark- und Sprühregen zu erproben.

Zur Untersuchung der physiologischen Blendwirkung werden fünf Blendquellen eingesetzt, welche die Lichtpunkte einer ortsfesten Straßenbeleuchtungsanlage repräsentieren. Die Größe und Position der Lichtpunkte orientieren sich an der Geometrie der ortsfesten Straßenbeleuchtungsanlage der in Abbildung 2-1 gezeigten Teststraße.

Abbildung 4-1 zeigt den konzeptionellen Entwurf des Versuchsaufbaus. Der Lichtwurf des Projektors wird durch den gelben Kegel dargestellt. Das Regenereignis wird durch den blauen Schleier visualisiert. In dieser Darstellung nicht erkennbar sind die Blendquellen, die sich hinter der Leinwand befinden und durch diese hindurch scheinen.

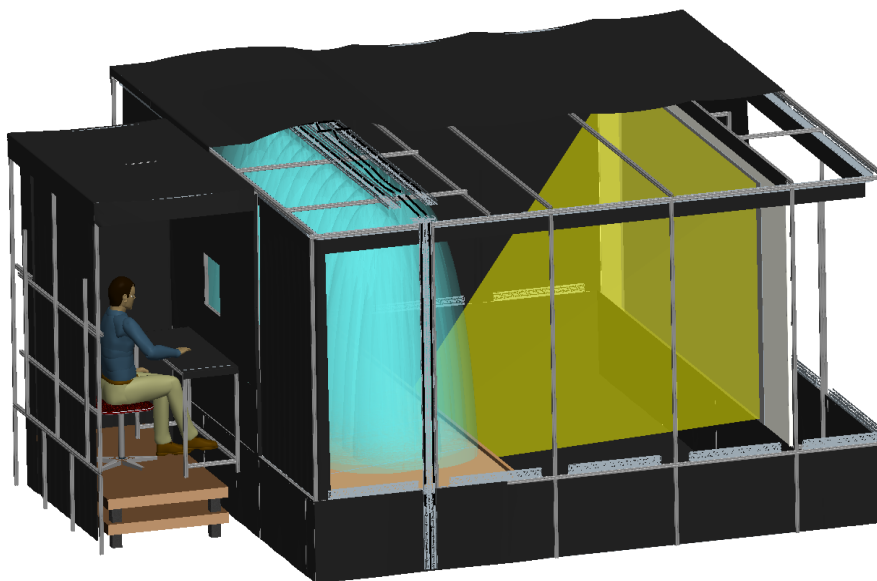


Abbildung 4-1: Visualisierung der Versuchsaapparatur.

Für die Einhaltung der Winkelbezüge zwischen dem Versuchsbild und den Blendquellen wird eine Referenz benötigt. Hierzu wird eine ideale Blickachse festgelegt, die in Abbildung 4-2 gezeigt ist. Ihr Ausgangspunkt befindet sich auf Höhe der Nasenwurzel eines idealen Beobachters, dessen Kopfposition durch Verwendung einer Kopfstütze eindeutig definiert ist (vgl. Abschnitt 4.3.1). Sie verläuft parallel zum Boden und tritt orthogonal auf der Projektionsebene auf. Der Schnittpunkt mit der Projektionsebene definiert den Referenzpunkt, der mit dem Licht eines rückwärtig angebrachten Lasers markiert wird. Der Referenzpunkt bildet den Ursprung eines kartesischen Bezugskoordinatensystems mit horizontaler (x) und vertikaler (y) Richtung, anhand dessen der Fixationspunkt des projizierten Versuchsbildes ausgerichtet wird und die Bemessung der Blendquellenpositionen erfolgt.

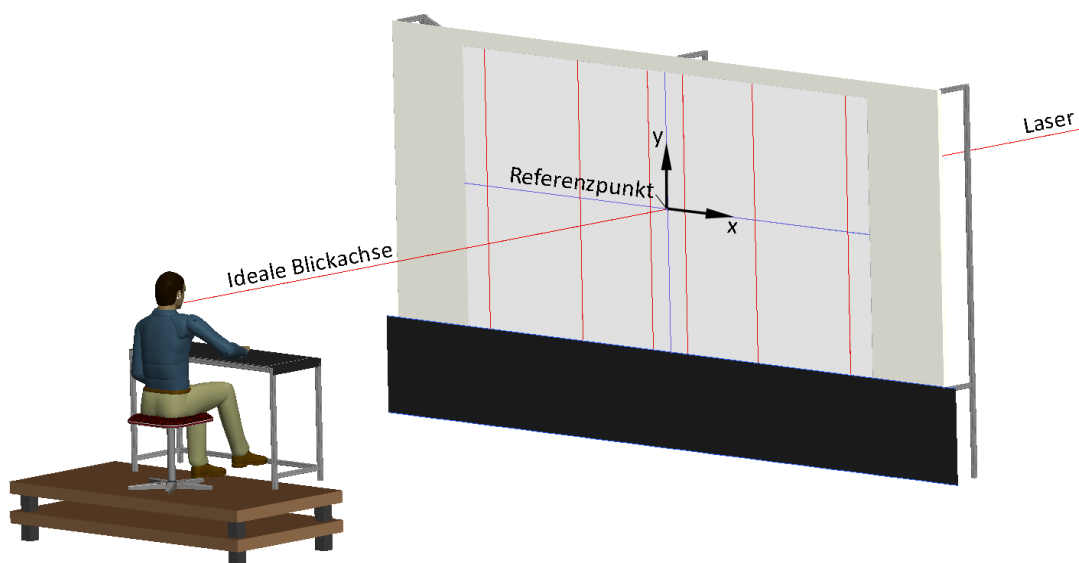


Abbildung 4-2: Referenzpunkt der Versuchsumgebung (Festlegung mittels idealer Blickachse, Darstellung mittels Lasermarkierung).

Bei der in Abbildung 4-2 gezeigten grafischen Darstellung auf der Projektionswand handelt es sich um ein Testbild (vgl. Abbildung 4-24), welches für die Validierung der Objektpositionen generiert wurde und im Rahmen der Fehlerbetrachtung erläutert wird.

4.2.3 Schwellenbestimmung

Gegenstand der Untersuchung ist die Bestimmung der absoluten Leuchtdichteschwelle, d. h. dem kleinsten notwendigen Leuchtdichteunterschied zwischen dem Sehobjekt (Reiz) und seiner Umgebung, um das Objekt bei den vorherrschenden Sehbedingungen gerade zu erkennen [SCHMIDT 1997]. Die Schwellenbestimmung erfolgt durch Ausübung einer Sehaufgabe, bei der Versuchspersonen die Erkennbarkeit der Sehobjekte an den vorgesehenen Positionen innerhalb des Bewertungsfeldes beurteilen.

Für die Art der Reizdarbietung wird die Methode der konstanten Reize (Konstanzmethode) gewählt, da sie in der Literatur als zuverlässiges [SCHMIDT 1997] und genauestes

[GOLDSTEIN 2002] Verfahren zur Schwellenbestimmung gilt. Bei dieser Methode werden den Versuchspersonen in zufälliger Reihenfolge unter- und überschwellige Reize (Reizstärken) an den vorgesehenen Objektpositionen wiederholt dargeboten. Das Erkennbarkeitsurteil wird durch die drei Antwortmöglichkeiten ‚Links‘, ‚Rechts‘ und ‚Nein‘ erfasst. Gegenüber dem Ansatz mit zwei Antwortmöglichkeiten (‚Ja‘, ‚Nein‘) führt die richtungsabhängige Differenzierung des erkannten Reizes zur Reduktion der Ratewahrscheinlichkeit von 50,0 % auf 33,3 %. Aus den Antworten werden die relativen Erkennungshäufigkeiten (Detektionswahrscheinlichkeiten) abgeleitet, deren Verlauf sich in Abhängigkeit der Reizstärke durch eine psychometrische Funktion approximieren lässt. Sie verläuft sigmodal und entspricht in den meisten Fällen dem Integral einer Gauß-Verteilung [SCHMIDT 1997], wobei für die Anpassung an die kumulierte Form der Normalverteilung ggf. eine geeignete Transformation der unabhängigen Variablen (z. B. durch Logarithmieren) erforderlich ist. Die Leuchtdichteschwelle ergibt sich aus der Funktionsgleichung für eine Detektionswahrscheinlichkeit von $p_{th} = 0,5$ (vgl. Abschnitte 2.2 und 4.6.2).

Diese Arbeit verwendet für jede Objektposition sechs verschiedene Reizstärken und liegt damit in dem typischen Wertebereich, der nach [GOLDSTEIN 2002] 5 – 9 Reizstärken umfasst. Die Wiederholungsrate wird pro Reizstärke und Objektposition auf fünf festgelegt. Sie ist damit kleiner als der typische Wert von 10 [GOLDSTEIN 2002], hinsichtlich des zeitlichen Umfangs der Untersuchung wird diese Reduktion jedoch in Kauf genommen.

Zur Abschätzung der Datengüte erlaubt die Konstanzmethode die Anwendung der Signaldetektionstheorie (SDT), mit der sich analysieren lässt, wie gut Versuchspersonen in der Lage sind, zwischen einem dargebotenen Objekt (Reiz) und einem nicht dargebotenen Objekt (kein Reiz) zu unterscheiden. Hierzu werden im Versuch auch Szenen ohne Reiz, sogenannte Nullbedingungen (Catch Trials, kurz Catch), gezeigt. Das resultierende Antwortschema der SDT zeigt Tabelle 4-2. Im Falle eines dargebotenen Reizes kann die Versuchsperson diesen erkennen (Treffer) oder auch nicht (Verpasser), woraus sich die Leistungsfähigkeit der Versuchsperson (Leistungskomponente) bestimmen lässt. Bei der Nullbedingung (kein Reiz) kann der Proband diese durch das Erkennungsurteil ‚Nein‘ bestätigen (Korrekte Verneinung) oder fälschlicherweise angeben einen Reiz zu erkennen (Falscher Alarm), woraus die Motivationslage der Versuchsperson (Reaktionsneigung, Bias) abgeleitet werden kann. Die Angabe eines falschen Alarms lässt sich auf die zufällige Aktivierung des Nervensystems (Rauschen) zurückführen.

Tabelle 4-2: Antwortschema der Signaldetektionstheorie (SDT).

Detektionsurteil	Art der Darbietung	
	Objekt (Reiz)	Kein Objekt (kein Reiz)
Erkannt	Treffer (T)	Falscher Alarm (FA)
Nicht erkannt	Verpasser (V)	Korrekte Verneinung (KV)

4.3 Apparatur

Die für die Versuche dieser Arbeit entworfene Apparatur besteht aus einem Gerüst aus Aluminiumprofilen. Zur Unterdrückung von äußeren Lichteinflüssen sowie innerem Streulicht sind Seiten, Decke und Boden der Konstruktion mit schwarzem Stoff verkleidet. Die äußeren Maße des Aufbaus betragen etwa 6,1 m x 5,0 m x 2,8 m (l x b x h). Der Beobachtungsabstand zwischen der vertikalen Ebene am Auge der Versuchsperson und der Leinwand beträgt $a = 4,36$ m.



Abbildung 4-3: Versuchsaufbau [Foto: I. HERZOG, Ilmenau].

Abbildung 4-3 zeigt den Aufbau mit seitlich geöffneten Vorhängen, wodurch ein Blick auf die Positionen der Versuchsperson und des projizierten Bildes gewährt wird. Die vor gelblichem Hintergrund dargestellte Sehaufgabe mit weißem, quadratischem Sehobjekt ist exemplarisch und entspricht nicht der im Versuch verwendeten Lichtfarbe und Größenordnung. Im vorderen Bereich der Abbildung befindet sich der seitlich neben dem Versuchsstand positionierte Arbeitsplatz des Versuchsleiters. Während der Untersuchungen sind die Vorhänge geschlossen und der Raum abgedunkelt.

Der Aufbau wurde in einer leeren Halle errichtet. Äußere Einflüsse durch Schwingungen, Lärm oder Tageslicht traten nicht auf. Die mittlere Umgebungstemperatur betrug $T \approx 19$ °C und unterlag keinen großen Schwankungen.

Die Apparatur unterteilt sich in drei Bereiche, die anhand der technischen Zeichnung in Abbildung 4-4 verdeutlicht werden. Der vordere Bereich ist für die Versuchsperson vorgesehen. Der mittlere Bereich entspricht dem Versuchsraum, in dem die Sehaufgabe dargestellt wird. Hierin befinden sich der Projektor mit Filtervorrichtung, die Projektionswand und die Beregnungsanlage. Hinter der Projektionswand schließt sich der dritte Bereich an, in dem sich die Blendquellen befinden. Nachfolgend werden die einzelnen Bereiche und Komponenten ausführlicher beschrieben.

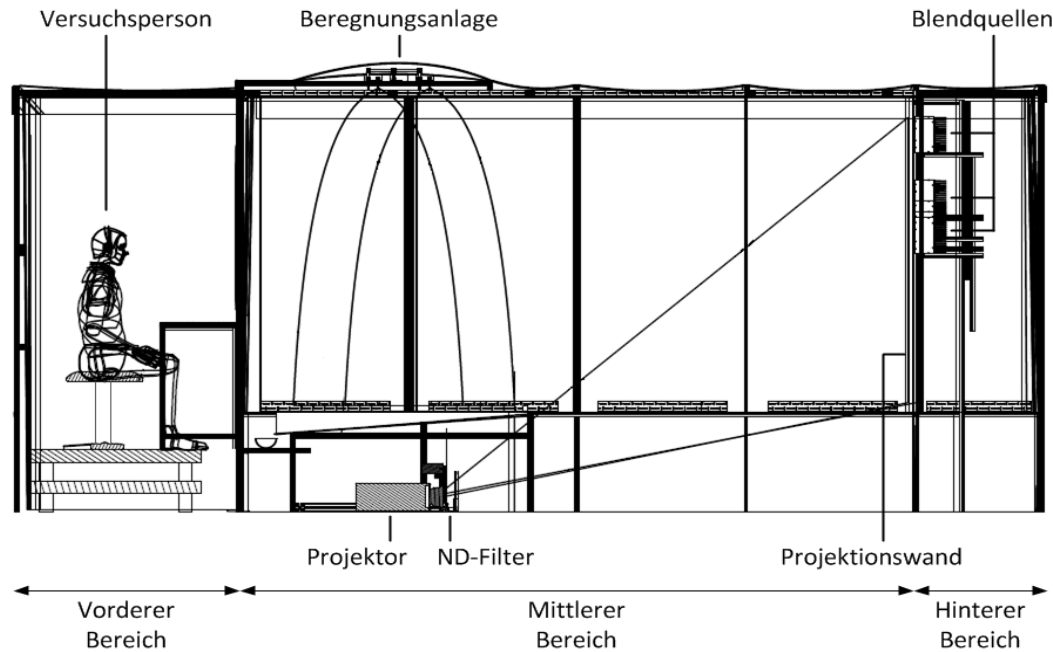


Abbildung 4-4: Technische Zeichnung des Versuchsaufbaus in der Seitenansicht.

4.3.1 Probandenposition und Eingabegerät

In sitzender Körperhaltung wird der Kopf der Versuchsperson mittels einer Kopfstütze fixiert, die auf einem kleinen Tisch mit hinreichend großer und gepolsterter Armauflage befestigt ist. Abgesehen von individuellen physiologischen Abweichungen (Kopfform und Kopfgröße sowie Augenabstand) wurde von einem für alle teilnehmenden Versuchspersonen einheitlichen Blickfeld ausgegangen.

Durch ein Sichtfenster ist der Blick der Testperson geradeaus nach vorne in den Versuchsraum auf die Projektionswand gerichtet. Das Sichtfenster dient als Blende zur Abschattung von Streulicht, welches von den Konstruktionselementen und dem schwarzen Stoff reflektiert wird, und begrenzt das Blickfeld auf die Größe des Adaptationsfeldes, innerhalb dessen die Sehaufgabe dargeboten wird. Ein Gamepad (Controller) dient als Eingabegerät zur Erfassung der Sehurteile durch die Versuchsperson. Es wird mit beiden Händen gehalten.

4.3.2 Projektor und Leinwand

Es wurde ein Digitalprojektor von PANASONIC (Typ *PT-DZ6700E*) mit Weitwinkelobjektiv (Typ *ET-DLE080*) verwendet. In Voruntersuchungen wurden geeignete Projektoreinstellungen (u. a. Farb- und Kontrasteinstellungen, Zoom, Lampenleistung) ermittelt und dessen Betriebsstabilität unter Verwendung dieser Parameter bestimmt. Abbildung 4-5 zeigt den zeitlichen Verlauf der relativen Beleuchtungsstärke, der mit dem Beleuchtungsstärkemesser *HCT-99* von GIGAHERTZ-OPTIK GMBH aufgezeichnet wurde. Der höchste

Wert ergibt sich in den ersten Minuten nach dem Einschalten (Kaltstart). Mit zunehmender Betriebsdauer nimmt die Beleuchtungsstärke ab und erreicht nach etwa 6 h ein stabiles Niveau. Für die Arbeit mit dem Projektor wurde eine Anlaufphase von 60 min festgelegt, die vor dem Beginn von Messungen und den Versuchsreihen berücksichtigt wurde. Unter Annahme einer Betriebszeit von 12 h ergibt sich eine Schwankungsbreite von etwa 4 %, deren Mittelwert 95,7 % der maximalen Lichtleistung entspricht.

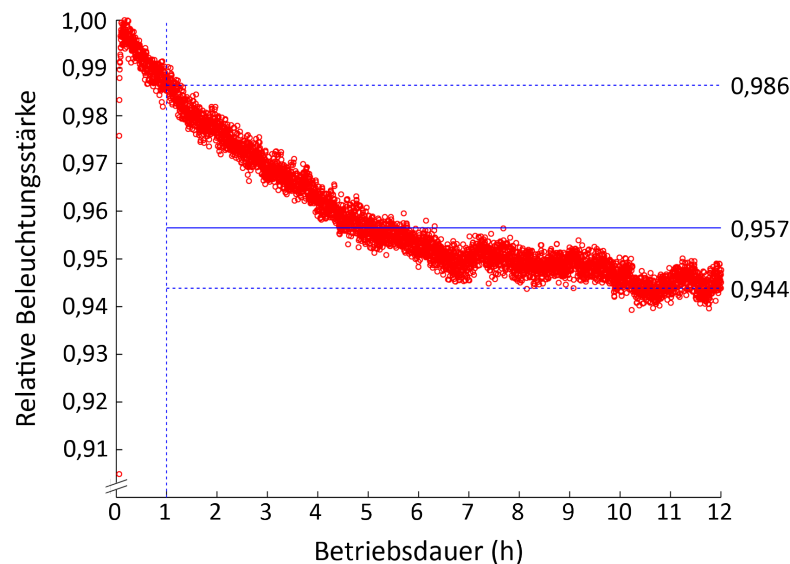


Abbildung 4-5: Betriebsstabilität des Projektors.

Der Projektor wurde unter der Drainage der Beregnungsanlage positioniert, um eine Aufhellung der Regenwand durch dessen Lichtwurf zu vermeiden. Die Apertur wurde mittig zur Leinwand ausgerichtet und hatte von dieser einen Abstand von 2,73 m. Die Position des Projektors wurde in Längs- und Querrichtung durch einen Anschlag mechanisch fixiert. Vor dem Projektor wurde eine Vorrichtung mit zwei Ebenen, bestehend aus einem Filterrast und einem zusätzlichen Filterrast, für den Einsatz von Neutralsdichtefiltern (ND-Filter) von LEE FILTERS vorgesehen (Abbildung 4-6).

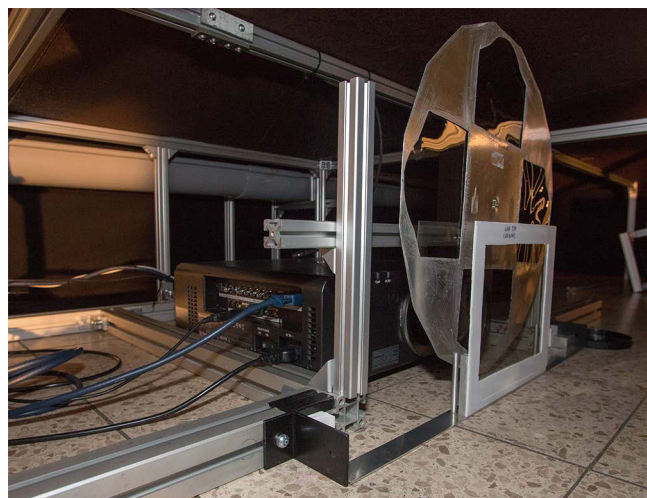


Abbildung 4-6: Projektor mit vorgesetzten ND-Filtern [Foto: I. HERZOG, Ilmenau].

Die ND-Filter dienten zur Komprimierung des Helligkeitsbereiches, wodurch eine feiner abgestufte Helligkeitsregelung der Versuchsbilder möglich war. Für jede Kombination aus Adaptationsleuchtdichte und -farbe wurde eine individuelle Filterkonstellation verwendet. Bei der Einmessung der Versuchsreize wurde die jeweils benötigte Filterkombination verwendet. Hierdurch wurde der Einfluss der Filter berücksichtigt, so dass die separate Messung der Stoffkennzahlen nicht notwendig war.

Als Leinwand wurde eine spezielle Projektionsfolie (Typ *STUDIO*[®] von GERRIETS GMBH) gewählt, die für hochauflösende Auf- und Rückprojektionen ausgelegt ist. Ihr Abstrahlverhalten wird durch die in Tabelle 4-3 gezeigten Leuchtdichtefaktoren (β) in Abhängigkeit des Blickwinkels (θ) quantifiziert. Dabei handelt es sich um Herstellerangaben. Wie bei den ND-Filtern sind auch die Stoffkennzahlen der Leinwand mit den Messungen der Versuchsreize bereits berücksichtigt und wurden daher nicht gesondert ermittelt.

Tabelle 4-3: Leuchtdichtefaktoren der Projektionswand.

Parameter	Wert		
θ	0°	±10°	±20°
$\beta_{\text{Aufprojektion}}$	0,31	0,29	0,26
$\beta_{\text{Rückprojektion}}$	0,24	0,24	0,21

4.3.3 Projektion

Für das Versuchsbild wurde die native Auflösung des Projektors von 1920 x 1200 pxl (WUXGA⁷) verwendet. Die hiermit auf der Leinwand erzielte Größe des projizierten Bildes betrug 3,56 m x 2,24 m (b x h), wodurch sich eine mittlere Pixeldichte von gerundet 5,4 pxl/cm ergibt. Bei dem gegebenen Beobachtungsabstand von 4,36 m beträgt der Sehwinkel eines Pixels etwa 1,5'.

Die Projektion ragte konstruktionsbedingt über den unteren Rand der Leinwand hinaus. Obwohl der Bereich unterhalb der Leinwand mit schwarzem Stoff ausgekleidet war (vgl. Abbildung 4-2), sollte dieser Überstand vermieden werden. Um dabei nicht von der nativen Auflösung des Projektors abzuweichen, wurde jedes Versuchsbild mit einer Schwarzschiene am unteren Rand versehen. Somit ergab sich für das dargestellte Adaptationsfeld eine effektive Größe von 3,56 m x 1,83 m (b x h) bzw. 44° x 24°.

Die ursprüngliche Leuchtdichteverteilung der Projektion war durch die exzentrische Positionierung des Projektors zur Blickachse und den natürlichen Randlichtabfall stark inhomogen (Abbildung 4-7, oben). Die mit der Leuchtdichtemesskamera *LMK98-3 color*⁸ (LMK) mit 8 mm Objektiv der TECHNOTEAM BILDVERARBEITUNG GMBH gemessene Gesamtgleichmäßigkeit betrug für eine kreisrunde Fläche mit einem Winkel von $\theta = 10^\circ$ um den Fixationspunkt $U_0 = 65,9\%$. Für eine rechteckige Fläche, aufgespannt durch einen Winkel

⁷ WUXGA: Wide Ultra eXtended Graphics Array (Auflösung für Breitbildbildschirme im Format 16:10).

⁸ LMK Seriennummer: DXP1912.

von $\Theta = 20^\circ \times 10^\circ$, ergab sich ein Wert von $U_0 = 44,1\%$. Zur Verbesserung der Gleichmäßigkeit wurde eine Korrektur durchgeführt, bei der die ursprüngliche Leuchtdichteaufnahme projektiv entzerrt, invertiert, mit dem Gammafaktor des Projektors potenziert, normiert und abschließend in ein 8-Bit Graustufenbild (Korrekturbild) überführt wurde. Anschließend wurden die darzustellenden Bildinhalte mit diesem Korrekturbild gewichtet. Die hierdurch deutlich verbesserte Gesamtgleichmäßigkeit von $U_0 = 92,0\%$ ($\Theta = 10^\circ$) bzw. $U_0 = 84,8\%$ ($\Theta = 20^\circ \times 10^\circ$) wird als ausreichend erachtet, um bei den Untersuchungen von einem homogenen Adaptationsfeld ausgehen zu können (Abbildung 4-7, unten).

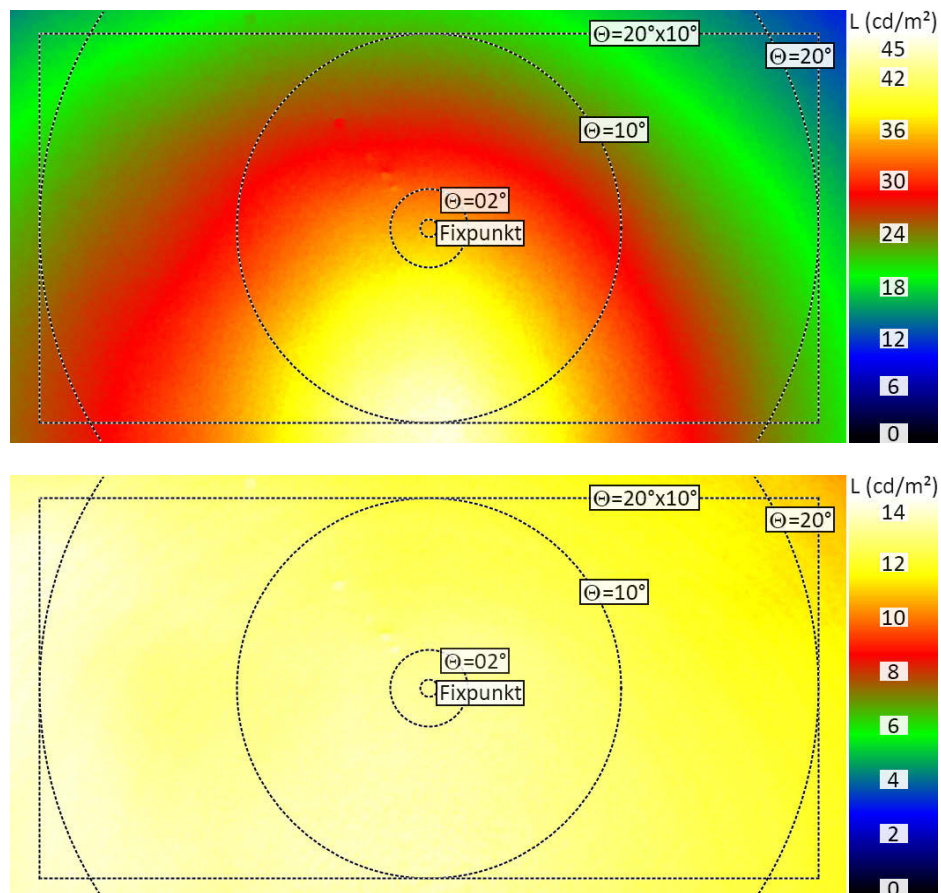


Abbildung 4-7: Leuchtdichteverteilung des Adaptationsfeldes ohne (oben) und mit Gleichmäßigkeitskorrektur (unten).

Unter Verwendung des Korrekturbildes und der jeweils festgelegten ND-Filterkombination wurden für jede Versuchssituation die Leuchtdichten und Lichtfarben von Adaptationsfeld und Sehobjekt eingemessen. Die Bestimmung der Leuchtdichtedifferenzen zwischen Sehobjekt und dessen Hintergrund erforderte eine orts aufgelöste Messung des Versuchsbildes. Hierzu wurde ebenfalls die LMK mit 8 mm Objektiv verwendet.

Die Spektren der Adaptationsfelder wurden in einer separat durchgeführten Labormessung mit dem Spektroradiometer *Specbos 1211* der JETI TECHNISCHE INSTRUMENTE GMBH bestimmt. Abbildung 4-8 zeigt die relativen spektralen Verläufe der vier untersuchten Lichtfarben für das Adaptationsniveau $L_{\text{adapt}} = 1,0 \text{ cd/m}^2$. Die relativen Spektren aller erprobten Versuchsbedingungen sind im Anhang A.2 abgedruckt.

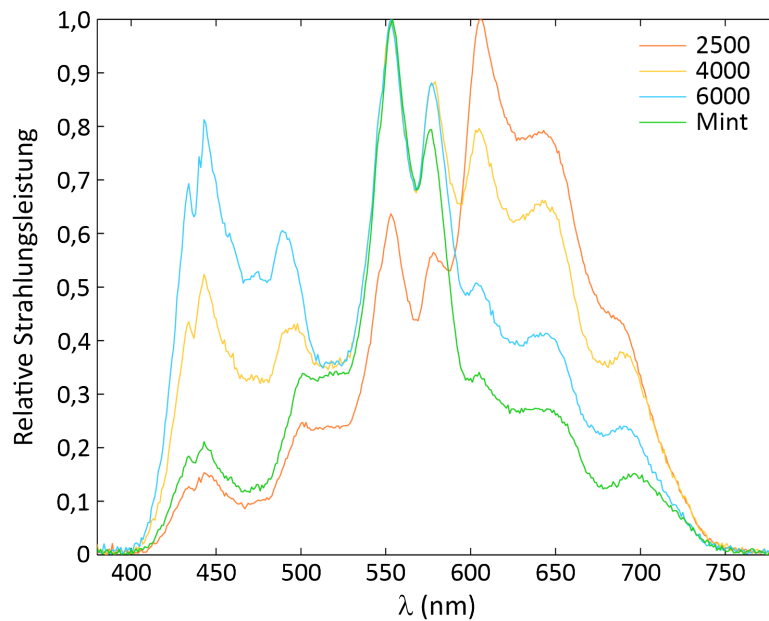


Abbildung 4-8: Relative Spektralverläufe der untersuchten Lichtfarben für $L_{\text{adapt}} = 1,0 \text{ cd/m}^2$.

Tabelle 4-4 fasst die Werte der untersuchten Versuchssituationen in numerischer Form zusammen. Die Sollwerte gehen aus der Variablendefinition (vgl. Abschnitt 4.1) hervor und wurden um die Farbwertanteile (x_{CIE} , y_{CIE}) des CIE-Normvalenzsystems ergänzt. Die den Sollwerten zugehörigen Messwerte wurden mit der Leuchtdichtemesskamera (LMK) erhoben. Da der Farbort der Lichtfarbe Mint außerhalb des Judd'schen Bereichs liegt, ist die Angabe einer ähnlichsten Farbtemperatur nicht sinnvoll. Ebenfalls angegeben sind die aus den Spektraldaten berechneten s/p -Verhältnisse.

Tabelle 4-4: Soll- und Messdaten sowie ND-Filter der Versuchsbedingungen.

Sollwerte				ND-Filter	Messwerte				
L_{adapt} (cd/m^2)	φ_{adapt} (K; ---)	x_{CIE}	y_{CIE}		L_{adapt} (cd/m^2)	CCT_{adapt} (K)	x_{CIE}	y_{CIE}	s/p
0,3	2500	0,4770	0,4137	0,6 + 0,15	0,2989	2519	0,4764	0,4152	1,058
	4000	0,3805	0,3768	0,6	0,2995	4015	0,3800	0,3772	1,568
	6000	0,3221	0,3318	0,6	0,2991	6037	0,3210	0,3361	1,984
	Mint	0,3800	0,4600	0,9 + 0,15	0,3007	---	0,3803	0,4625	1,446
1,0	2500	0,4770	0,4137	0,3	1,0010	2489	0,4784	0,4144	1,099
	4000	0,3805	0,3768	0,3 + 0,15	1,0010	3983	0,3807	0,3756	1,578
	6000	0,3221	0,3318	0,3 + 0,15	1,0010	6040	0,3213	0,3319	2,036
	Mint	0,3800	0,4600	0,6	0,9966	---	0,3793	0,4616	1,478
3,0	2500	0,4770	0,4137	---	3,0010	2507	0,4756	0,4123	1,135
	4000	0,3805	0,3768	---	3,0040	3984	0,3803	0,3742	1,638
	6000	0,3221	0,3318	0,15	2,9980	5958	0,3229	0,3312	2,058
	Mint	0,3800	0,4600	0,15	2,9950	---	0,3795	0,4570	1,520

4.3.4 Blendquellen

Für den Versuch wurden eigens fünf Blendquellen (BQ) entworfen und gefertigt, von denen eine in Abbildung 4-9 (links) gezeigt ist. Jede Blendquelle verwendet als Leuchtmittel eine LED-Platine von DILITRONICS GMBH, bestehend aus zwei LED-Clustern (Abbildung 4-9, rechts) mit jeweils 10 Mint (*Oslon LUW CQDP*), 6 Amber (*Oslon LA CPDP*) und 2 Blau (*Oslon LB CPDP*) emittierenden LEDs von OSRAM OS GMBH. Die Primärvalenz Mint bildet aufgrund ihres hohen Wirkungsgrades den Leistungsträger dieses Systems. Sie erscheint als grünstichiges Weiß und charakterisiert sich durch eine breitbandige Spektralverteilung. Die Bestromung der LEDs erfolgte mit dem Treiber *MCC16DMX* von DILITRONICS GMBH, der durch ein externes Netzteil (*SPS-9400* von MANSON) mit Konstantspannung ($U = 13,8 \text{ V}_{\text{DC}}$) versorgt wurde. Potentielle Spannungsschwankungen wurden durch die Ladungsregelung des Treibers ausgeglichen. Die Konfiguration ermöglicht eine individuelle Regelung der Primärvalenzen, wodurch Lichtfarbe und Helligkeit der Blendquellen innerhalb der Systemgrenzen beliebig einstellbar sind.

Der Lichtstrom der Blendquellen wird durch eine austauschbare Adapterplatte mit kurzem Tubus und kreisrunder Austrittsöffnung ausgekoppelt. Zur Maximierung von Lichtstrom und Gleichmäßigkeit der leuchtenden Austrittsfläche sowie Homogenität der Farbmischung wurden in Vorversuchen an den Innenseiten des Blendquellengehäuses drei verschiedene Beschichtungen (Spiegelfolie, Kinoleinwand, matter Weißlack) erprobt [KARTHAUS 2013]. Der diffus reflektierende Weißlack erwies sich als geeignet und wurde daher für die Innenbeschichtung aller Blendquellen verwendet.

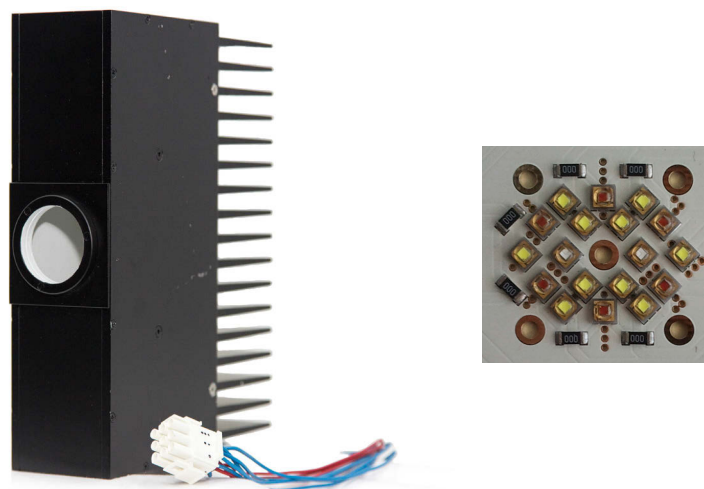


Abbildung 4-9: Blendquelle (links) und Detail eines der beiden in der Blendquelle enthaltenen LED-Clusters (rechts) [Fotos: I. HERZOG, Ilmenau].

Für die Bestimmung von Größe und Position der Lichtaustrittsfläche einer jeden Blendquelle wurden die realen Größenverhältnisse der Lichtpunktanordnung der Teststraße aus Abbildung 2-1 unter Beibehaltung der Perspektive an die Abstände im Labor umgerechnet. Dabei wurde für die Laboruntersuchung eine linksseitige Lichtpunktanordnung gewählt. Die resultierende Anordnung der Lichtpunkte aus Sicht der Beobachterposition

zeigt Abbildung 4-10. Zur besseren Veranschaulichung wurde ein abstrahiertes Bild des Straßenzuges mit künstlichem Horizont (oben) generiert, das dem Versuchsbild (unten) gegenübergestellt ist.

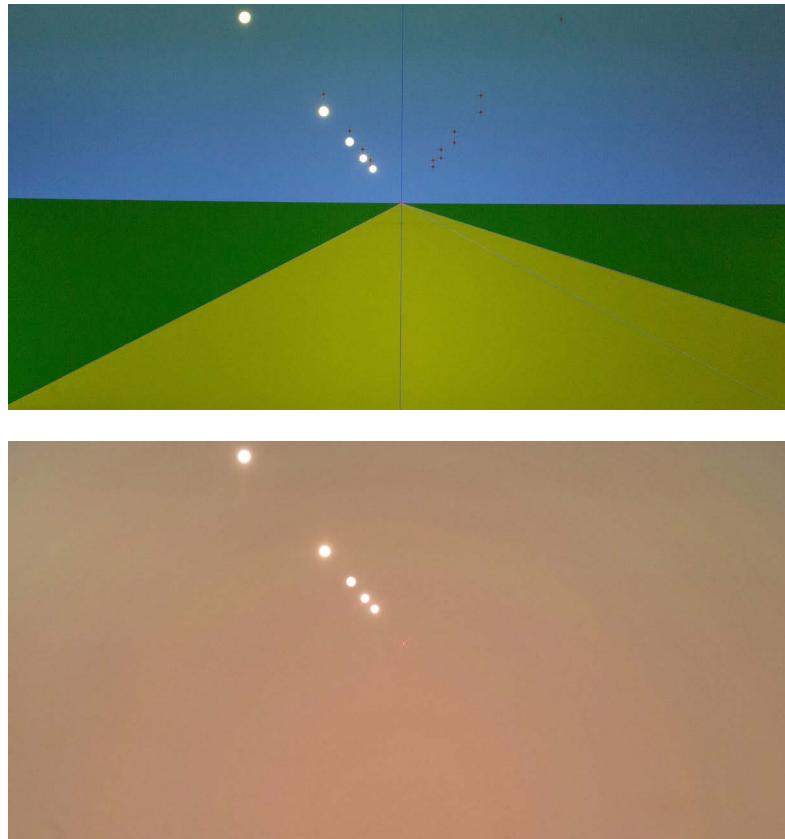


Abbildung 4-10: Anordnung der Blendquellen mit Testbild (oben) und im Versuch (unten) (Fotos: I. HERZOG, Ilmenau).

Tabelle 4-5 fasst die geometrischen Daten der Blendquellen zusammen. Die Koordinaten (x, y) beziehen sich auf das kartesische Bezugskordinatensystem mit Ursprung im Referenzpunkt (vgl. Abbildung 4-2), wobei sich negative x -Werte links vom Fixationspunkt befinden. Die Winkelangaben zur Blendquellengröße (Ω_{BQ} , α_{BQ}) sowie zum Abstand vom Referenzpunkt (θ_B) basieren auf der Beobachtungsentfernung von $a = 4,36$ m.

Tabelle 4-5: Geometrische Daten der Blendquellen.

Name	Größe			Position		
	d_{BQ} (mm)	Ω_{BQ} (sr)	α_{BQ} (°)	x (mm)	y (mm)	θ_B (°)
BQ1	45	$7,450 \cdot 10^{-5}$	0,296	-705	799	13,7
BQ2	38	$5,792 \cdot 10^{-5}$	0,250	-352	400	7,0
BQ3	32	$4,174 \cdot 10^{-5}$	0,210	-242	266	4,7
BQ4	28	$3,215 \cdot 10^{-5}$	0,184	-180	200	3,5
BQ5	25	$2,570 \cdot 10^{-5}$	0,164	-141	166	2,8

Das von den Blendquellen emittierte Licht wird rückwärtig durch die Projektionswand in den Versuchsraum eingekoppelt. Zur Vermeidung von Korona-Effekten wurden die Blendquellen mit ihrer Lichtaustrittsfläche bündig an der Leinwand positioniert. Die mattschwarze Lackierung der äußeren Gehäuseoberfläche minimiert Rückreflexionen, die durch die Aufprojektion des Projektors auf der Leinwand entstehen. Durch diese Maßnahme sind die Blendquellen im ausgeschalteten Zustand für die Versuchsperson kaum sichtbar und beeinträchtigen daher nicht die Gesamtgleichmäßigkeit des projizierten Adaptationsfeldes.

Zur Erzielung einer Schwellenerhöhung von $T_l = 20\%$ ist bei einem Adaptationsniveau von $L_{\text{adapt}} = 1,0 \text{ cd/m}^2$ in Entsprechung zu Gleichung 2-8 eine Schleierleuchtdichte von $L_v = 0,3077 \text{ cd/m}^2$ erforderlich. Unter der Annahme, dass alle Blendquellen dieselbe Leuchtdichte haben, wurde mittels Gleichung 2-5 und Gleichung 2-6 für jede Blendquelle eine Soll-Leuchtdichte von $L_{\text{BQ}} = 3285 \text{ cd/m}^2$ bestimmt. Die Berechnung verwendet einen Altersfaktor von $k = 10,07$, der sich aus dem Medianalter des verwendeten Probandenkollektivs (vgl. Abschnitt 4.4) ergibt. Für die Messung wurde die LMK mit 25 mm Objektiv verwendet. Die Sollwerte sowie die gemessenen Leuchtdichte- und Farbwerte sind für die jeweils zu untersuchende Lichtfarbe in Tabelle 4-6 (2500 K) und Tabelle 4-7 (6000 K) dargestellt. Die vertikalen Blendbeleuchtungsstärken sind rechnerisch bestimmte Größen, die auf den gemessenen Leuchtdichtewerten basieren.

Die Betriebsstabilität der Blendquellen wurde in umfangreichen Voruntersuchungen charakterisiert [KARTHAUS 2013]. Dabei wurden die orts aufgelöste Temperaturentwicklung des Gehäuses (inkl. Kühlkörper), der Verlauf der absoluten Leuchtdichte sowie die Stabilität der Farbwertanteile des CIE-Normvalenzsystems in Abhängigkeit der Betriebsdauer bestimmt. Unter gleichzeitiger Vollaussteuerung aller Kanäle, d. h. bei maximaler thermischer Belastung, wurde ein stabiler Leuchtdichtewert nach 90 min erreicht, der ca. 7,5 % unterhalb des Startwertes (Kaltstart) lag. In diesem Zeitraum stieg die Gehäusetemperatur der Blendquelle an der heißesten Stelle von 23 °C auf 46 °C. Die Farbwerte zeigten sich weitgehend stabil und damit unabhängig von der thermischen Betrachtung. Für die im Probandenversuch verwendeten Lichtfarben stieg die Gehäusetemperatur bei 60-minütigem Dauerbetrieb von anfangs 23 °C um 10 °C (2500 K) bzw. 15 °C (6000 K) an. Da die Blendquellen im Probandenversuch mit geringeren Kanalaussteuerungen und kurzen Einschaltzeiten ($t_{\text{BQ}} = 400 \text{ ms}$) betrieben wurden, wird für die vorgesehenen Leuchtdichten ein näherungsweise stabiler Betrieb angenommen.

Ferner wurden die Leuchtdichteverteilung und die ähnlichste Farbtemperatur der Blendquellen auf der Projektionswand in einem horizontalen Winkelbereich von $\Theta = \pm 40^\circ$ mit einer Schrittweite von $\Delta\Theta = 10^\circ$ bestimmt. Die Gesamtgleichmäßigkeit zeigte sich weitestgehend unabhängig von Messwinkel und Lichtfarbe. Sie betrug im Mittel $U_0 = 0,57$ (2500 K) bzw. $U_0 = 0,56$ (6000 K). Vergleichbar stabil zeigten sich auch die Verläufe der Farbtemperaturen.

Tabelle 4-6: Photometrische Daten der Blendquellen für $CCT = 2500\text{ K}$ bei $L_{\text{adapt}} = 1,0\text{ cd/m}^2$.

Sollwerte	L_{BQ} (cd/m^2)	$E_{\text{B,ges}}$ (lx)	$L_{\text{v,ges}}$ (cd/m^2)	CCT (K)	x_{CIE}	y_{CIE}
	3285	0,753	0,3077	2500	0,4770	0,4137
Messwerte	L_{BQ} (cd/m^2)	E_{B} (lx)	L_{v} (cd/m^2)	CCT (K)	x_{CIE}	y_{CIE}
BQ1	3641	0,263	0,0141	2531	0,4739	0,4127
BQ2	3752	0,216	0,0447	2477	0,4805	0,4163
BQ3	3221	0,134	0,0607	2518	0,4762	0,4148
BQ4	3172	0,102	0,0825	2521	0,4756	0,4141
BQ5	3290	0,084	0,1087	2533	0,4773	0,4186
SUMME		0,799	0,3107			
TI			20,2			

Tabelle 4-7: Photometrische Daten der Blendquellen für $CCT = 6000\text{ K}$ bei $L_{\text{adapt}} = 1,0\text{ cd/m}^2$.

Sollwerte	L_{BQ} (cd/m^2)	$E_{\text{B,ges}}$ (lx)	$L_{\text{v,ges}}$ (cd/m^2)	CCT (K)	x_{CIE}	y_{CIE}
	3285	0,753	0,3077	6000	0,3221	0,3318
Messwerte	L_{BQ} (cd/m^2)	E_{B} (lx)	L_{v} (cd/m^2)	CCT (K)	x_{CIE}	y_{CIE}
BQ1	3673	0,266	0,0142	6049	0,3213	0,3286
BQ2	3755	0,216	0,0448	5869	0,3246	0,3340
BQ3	3262	0,136	0,0615	6197	0,3185	0,3280
BQ4	3173	0,102	0,0825	6037	0,3214	0,3301
BQ5	3286	0,084	0,1085	5968	0,3227	0,3318
SUMME		0,804	0,3115			
TI			20,2			

4.3.5 Beregnungsanlage

Für die Untersuchungen mit Regen wurde eine Beregnungsanlage mit einem geschlossenen Wasserkreislauf konzipiert. Die Anlage verwendet Komponenten des *Micro-Drip-Systems* der GARDENA GMBH und arbeitet mit einer Fördermenge von maximal 2200 l/h. Durch eine Reduzierstufe wird der eingangsseitige Wasserdruck auf etwa 1,5 bar stabilisiert, so dass im Betrieb ein konstanter Wasserdurchsatz angenommen werden kann.

Die Anlage ist mit zwei Wasserkreisen ausgelegt (vgl. Abschnitt 4.2.2), die sich in der verwendeten Düsencharakteristik unterscheiden. Die Betriebsart ‚Starkregen‘ wird mittels *Micro-Drip-Sprühdüsen*, die Betriebsart ‚Sprühregen‘ durch *Micro-Drip-Nebeldüsen* realisiert. Zwei Ventile an der Hauptwasserversorgung ermöglichen die manuelle Zu- bzw. Abschaltung der jeweiligen Betriebsart (Abbildung 4-11, rechts).



Abbildung 4-11: Beregnungsanlage mit Düsen (links) und Hauptventil (rechts) [Fotos: I. HERZOG, Ilmenau].

Für jede Betriebsart wurden zwei parallel zueinander angeordnete Regenlinien mit jeweils 9 Austrittsdüsen im Dach des Versuchstandes installiert (Abbildung 4-11, links), wodurch eine räumliche Tiefe des Regenereignisses von ca. 150 cm erzielt wurde. Zur besseren Verteilung des Wasserdrucks mündeten die wasserspeisenden Zuleitungen mittig an den Regenlinien. Durch Regulierventile vor jeder Düse konnten Druckabfälle in jeder Regenlinie kompensiert und der Wasserdurchsatz jeder Düse individuell eingestellt werden. Für jede Regenart wurden die Ausrichtungen der Düsen und Regulierventile derart justiert, dass nach visueller Bemusterung im Sichtfeld der Versuchsperson eine geschlossene Regenwand erzeugt werden konnte.

Für die quantitative Beschreibung der erzielten Regenarten wurde jeweils deren Tropfenspektrum (Tropfenanzahl pro Tropfengröße) mit einem *Laser-Niederschlags-Monitor (Distrometer)* der ADOLF THIES GMBH & CO. KG an verschiedenen Positionen quer und längs zur Blickrichtung gemessen. Aus dem Tropfenspektrum wurde dann der mittlere Tropfendurchmesser (Median) für die jeweilige Regenart gebildet. Für Starkregen (R_{st}) ergab sich ein Wert von $d_{R_{st}(MED)} = 1 \text{ mm}$, was einer [DIN IEC 60721-2]-Klassifikation von ‚mäßigem Regen‘ bis ‚intensivem Regen‘ entspricht (vgl. Tabelle 2-1). Aufgrund des hohen Wasserdurchsatzes und der damit verbundenen hohen Niederschlagsmenge (Intensität) wird das Regenereignis als Regenklasse 4 (‚intensiver Regen‘) eingestuft. Das als Sprühregen (R_{sp}) deklarierte Regenereignis ist mit einem Wert von $d_{R_{sp}(MED)} = 0,185 \text{ mm}$ gemäß der Tabelle als ‚leichter Regen‘ (Regenklasse 2) zu interpretieren.

4.3.6 Steuerung

Für die Kommunikation zwischen den elektronischen Komponenten der Apparatur wurde die *Lighting Application Suite*⁹ (LAS) der E:CUE CONTROL GMBH verwendet. Hierbei handelt es sich um eine softwarebasierte Mediensteuerung, die eine DMX¹⁰-Engine bereitstellt. Durch die eingebettete Programmierungsumgebung (e:script) und die Möglichkeit der Einbindung weiterer Schnittstellen (u. a. MIDI¹¹ und RS-232¹²) bietet die Steuerung ein hohes Maß an Flexibilität. Zur einfachen Anwendung im Labor wurde eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) entwickelt, mit der individuell auf sämtliche elektronische Komponenten des Aufbaus zugegriffen und der Ablauf der Versuchsreihen verwaltet werden konnte. Abbildung 4-12 zeigt beispielhaft die Benutzeroberfläche bei automatisiertem Ablauf einer Versuchsreihe.

Als Bildquelle für den Projektor diente der Medienserver *Pandoras Box*¹³ (PB) von COOLUX GMBH, der auf einem separaten Computer ausgeführt wurde. Die Versuchsbilder wurden in indexierbaren Containern eines zeitstrahlbasierten Ablaufs gespeichert. Über die Opazität konnte die Helligkeit aller im Ablauf befindlichen Bilder gleichzeitig mit einer Auflösung von 8-Bit angepasst werden, wodurch betriebsbedingte Schwankungen des Projektorleuchtmittels im Bedarfsfall näherungsweise kompensiert werden konnten.

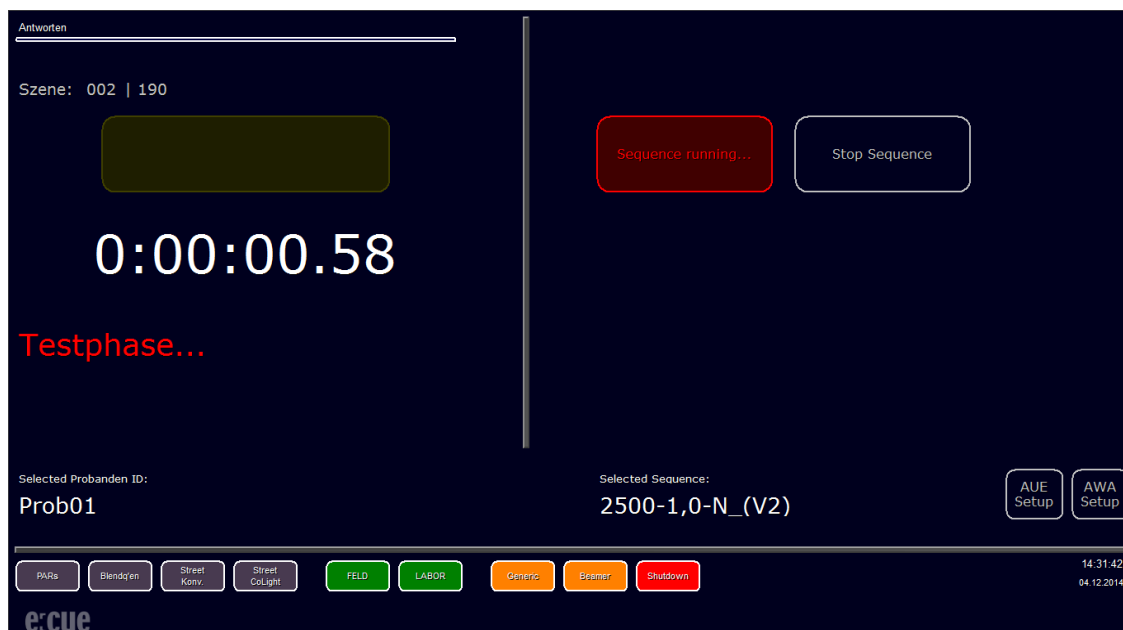


Abbildung 4-12: Benutzeroberfläche der Steuerung für den automatisierten Ablauf der Versuchsreihen.

⁹ LAS Lizenz: Enterprise-SR1, Version: 6.0.78.4673.

¹⁰ DMX: Digital Multiplex (Digitales Steuerprotokoll).

¹¹ MIDI: Musical Instrument Digital Interface (Kommunikationsprotokoll).

¹² RS-232: Serielle asynchrone Schnittstelle.

¹³ PB Lizenz: Educational Edition, Version: V5 Server (Rev7832).

Die Steuerungsinfrastruktur des Versuchsaufbaus ist in Abbildung 4-13 schematisch skizziert. Farblich hervorgehoben sind die verschiedenen Funktionsgruppen des Systems. Die orange markierte Funktionsgruppe ‚Steuerung‘ bildet den Kern der Infrastruktur. Die zur Funktionsgruppe ‚Projektion‘ zugehörigen Komponenten sind grün markiert. Weitere Funktionsgruppen bilden die ‚Blendquellen‘ (gelb), die ‚Beregnungsanlage‘ (blau), der ‚Probandenbereich‘ (violett), sowie ‚Sonstige‘ (grau).

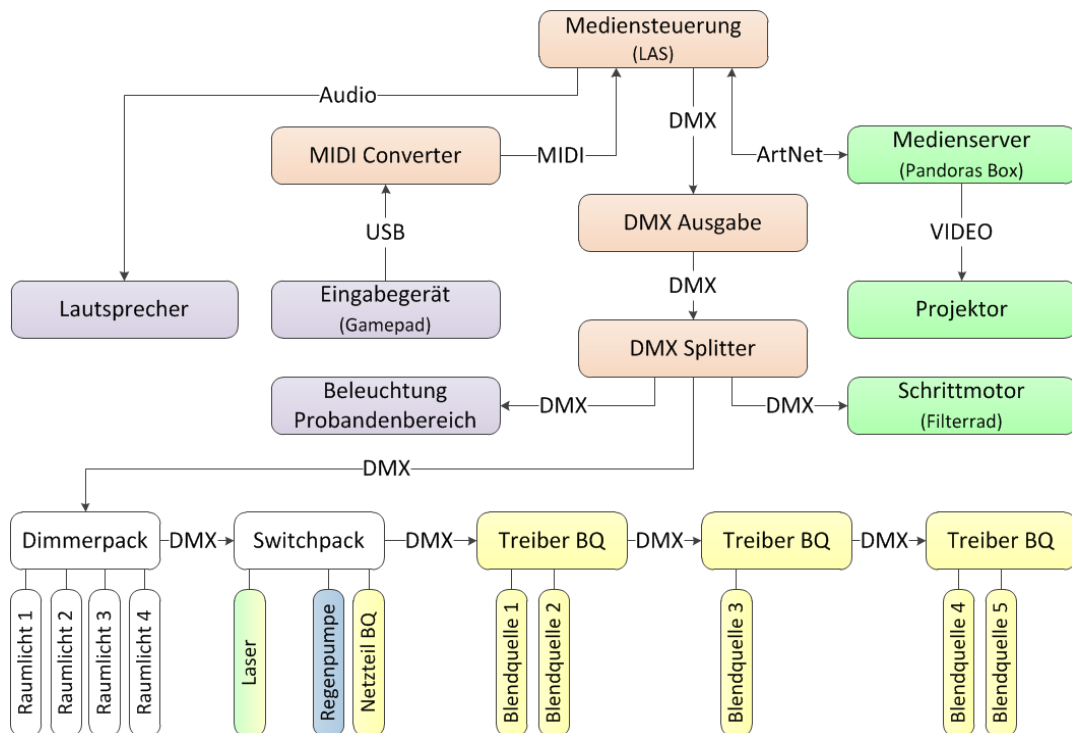


Abbildung 4-13: Steuerungsinfrastruktur des Laboraufbaus.

Es wurden zwei DMX-Universen verwendet. Das DMX-Universum 1 wurde über eine USB¹⁴-Schnittstelle ausgegeben und anschließend über den Splitter verteilt. Es übertrug Steuerdaten an den Schrittmortortreiber des Filtrrades, die Treiber der Blendquellen, die Beleuchtung des Probandenbereichs, das Dimmerpack für die Raumbeleuchtung sowie das Switchpack für die Lastschaltung von Regenpumpe, Laser (Referenzpunkt) und dem Netzteil der Blendquellentreiber. Der Medienserver wurde über DMX-Universum 2 angesprochen und via Art-Net¹⁵ in die Steuerung integriert. Der Projektor erhielt seine Bilddaten über die DVI¹⁶-Schnittstelle des Medienservers. Zum Abruf der versuchsspezifischen Projektoreinstellungen und zur präzisen Ausrichtung der Projektion auf der Leinwand wurde der Projektor zusätzlich über die RS-232-Schnittstelle in die LAS eingebunden. Über ein Makroskript konnten die benötigten Einstellungen vor jedem Versuch geladen und an den Projektor übertragen werden. Die auf dem Gamepad abgegebenen Sehurteile wurden über eine USB-Verbindung an den Steuerrechner übertragen, dort in

¹⁴ USB: Universal Serial Bus.

¹⁵ Art-Net: Datenprotokoll zur Übertragung von DMX-Signalen über Ethernet.

¹⁶ DVI: Digital Visual Interface.

MIDI-Signale konvertiert und anschließend über eine virtuelle MIDI-Verbindung an die LAS übermittelt.

Infolge möglicher Störeinflüsse durch Schaltnetzteile und Dimmer wurde die elektrische Last auf verschiedene Phasen verteilt. Phase 1 versorgte die Steuertechnik, die Lautsprecher und die Beleuchtung im Probandenbereich. Der Projektor wurde an Phase 2 angeschlossen. Die elektrische Versorgung des Dimm- und Switchpacks erfolgte über Phase 3.

4.4 Probandenkollektiv

Die an den Untersuchungen teilnehmende Probandengruppe umfasste 32 Personen, bestehend aus 21 Männern und 11 Frauen, deren Altersverteilung in Abbildung 4-14 dargestellt ist. Das Durchschnittsalter des Kollektivs liegt bei $A_{MW} \approx 28$ Jahren mit einer Standardabweichung von $\sigma = 7,35$ Jahren. Aufgrund der linkssteilen Verteilungsform ist der Median mit $A_{MED} = 25,5$ Jahren das robustere Lagemaß. Mit diesem Altersdurchschnitt ist kein signifikanter altersbedingter Einfluss auf die Untersuchungsergebnisse zu erwarten [DAVOUDIAN 2014], [MORTENSON 1980].

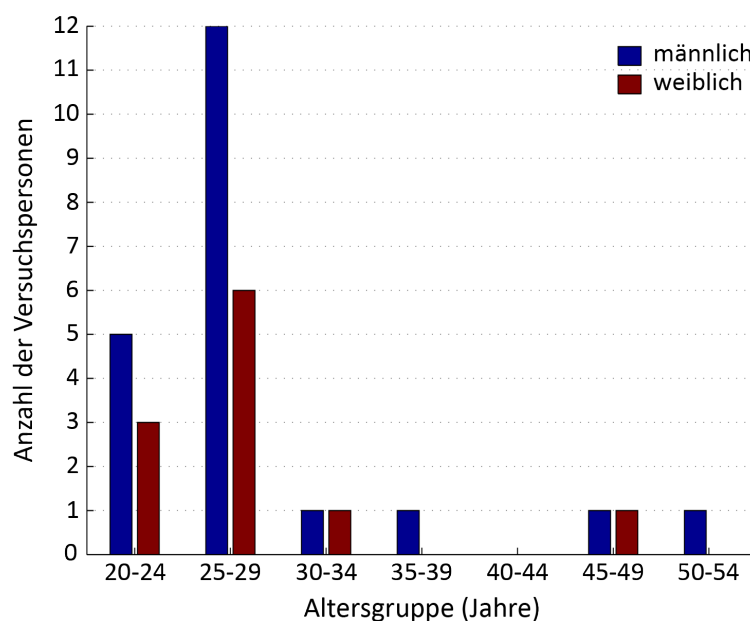


Abbildung 4-14: Altersverteilung des Probandenkollektivs.

Alle Versuchspersonen wurden im Vorfeld einem Eignungstest unterzogen, bei dem Sehschärfe (Visus), Kontrastempfindlichkeit, Farbfehlsichtigkeit und Blendempfindlichkeit untersucht wurden. Versuchspersonen mit Sehhilfe verwendeten diese während des Eignungstests und den Versuchen. Die Sehschärfeprüfung erfolgte mit dem Sehtestgerät *Vistech R22*¹⁷ von RODENSTOCK GMBH. Die Kontrastempfindlichkeit wurde mit dem Ferntest *VCTS*¹⁸ 6500 von VISTECH bestimmt. Zur Prüfung der Farbeignung wurden mit

¹⁷ Testscheibe Nr. 119 mit Landoltringen nach DIN 58229-5, Satz 1 und 2.

¹⁸ VCTS: Visual Contrast Test System.

dem *Farnsworth D-15* (gesättigt) und dem *Lanthony D-15* (ungesättigt) [LANTHONY 1978] zwei Farblegetests sowie die Farbtafeln nach *Velhagen*¹⁹ [BROSCHMANN 2011] verwendet. Zur Messung der Blendempfindlichkeit stand kein eigenes Messgerät dauerhaft zur Verfügung, so dass die Blendempfindlichkeit nur teilweise erhoben werden konnte. Hierzu wurde leihweise das Mesoptometer *Mesotest II* von OCULUS genutzt.

Von dem Kollektiv wurden 31 Personen als emmetrop gewertet. Lediglich eine Person zeigte eine Rot-Grün Schwäche. Diese Person wurde unter Vorbehalt zum Versuch zugelassen. Da sich ihre Ergebnisse nicht von denen der übrigen Personen auffällig unterschieden, wurde die Person bei der statistischen Auswertung nicht ausgeschlossen.

4.5 Versuchsdurchführung

Die Durchführung der Untersuchung wurde in insgesamt 22 Versuchsreihen organisiert. Nachfolgend wird zunächst eine Übersicht der Versuchsreihen gegeben und deren struktureller Aufbau erläutert. Daran schließen sich die Abschnitte zu den Versuchsbedingungen und dem Testzeichen (Sehobjekt) sowie dem Versuchsablauf an.

4.5.1 Versuchsreihen

Die Versuchsmatrix in Tabelle 4-8 gibt eine Übersicht der 22 Versuchsreihen. Die Trennlinie grenzt die normalen von den erschwerten Sehbedingungen ab. Es wird ersichtlich, dass die normalen Sehbedingungen umfangreich bei allen möglichen Kombinationen der Ausprägungen von Adaptationsniveau und Lichtfarbe untersucht wurden. Die erschwerten Sehbedingungen wurden mit einem reduzierten Umfang untersucht, um hierdurch den zeitlichen Aufwand der Testpersonen zu begrenzen. Erprobt wurden die Lichtfarben 2500 K und 6000 K bei einer Adaptationsleuchtdichte von 1,0 cd/m².

Tabelle 4-8: Versuchsmatrix.

L_{adapt} (cd/m ²)	φ_{adapt}				Sehbedingung
	2500 K	4000 K	6000 K	Mint	
0,3	✓	✓	✓	✓	Normal
1,0	✓	✓	✓	✓	Normal
3,0	✓	✓	✓	✓	Normal
1,0	✓		✓		Starkregen
1,0	✓		✓		Sprühregen
1,0	✓		✓		Blendung
1,0	✓		✓		Blendung + Starkregen
1,0	✓		✓		Blendung + Sprühregen

¹⁹ Tafeln 1-25 und K1-K4.

Jede Versuchsreihe stellt eine sequentielle Abfolge von Aktionen dar. Sie folgt dem in Abbildung 4-15 gezeigten Ablauf, der sich aus vier Phasen zusammensetzt. Für eine bessere Orientierung wurden die Versuchspersonen mit akustischen Hinweisen durch die einzelnen Phasen geführt.

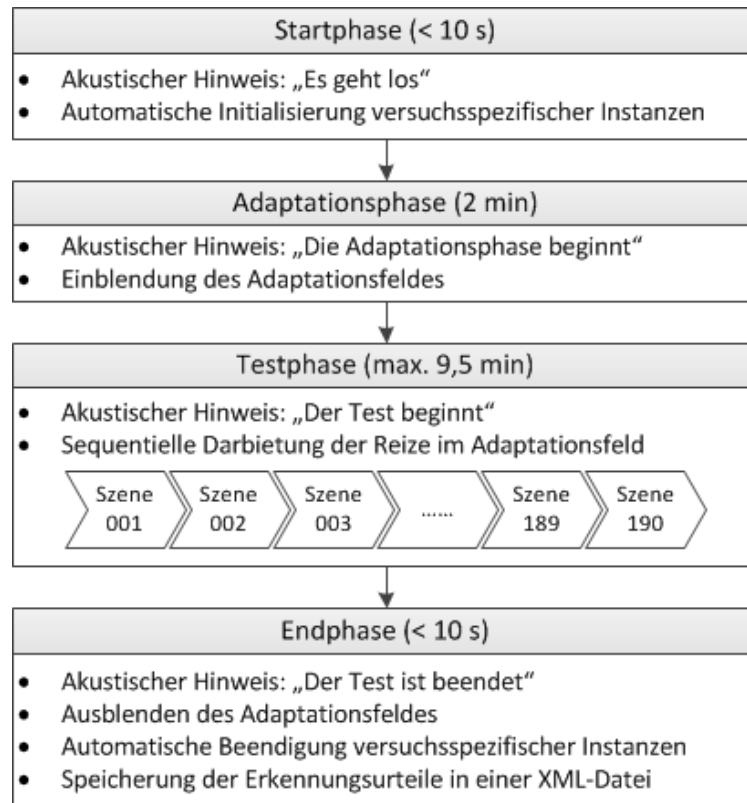


Abbildung 4-15: Ablauf einer Versuchsreihe.

In der ‚Startphase‘ werden alle versuchsspezifischen Instanzen von der Ablaufsteuerung initialisiert. Diese Phase dauert nur wenige Sekunden und erfolgt bei dunkelgetasteter Projektionsfläche. Sie wird durch den akustischen Hinweis „Es geht los“ eingeleitet.

Zu Beginn der zweiminütigen ‚Adaptationsphase‘ wird das Adaptationsfeld eingeblendet. Während dieser Phase passt sich die bereits dunkeladaptierte Versuchsperson an die dargebotene Helligkeit und Lichtfarbe der zu untersuchenden Versuchssituation an. Dabei brauchte der Blick nicht zwingend auf den Fixationspunkt gerichtet sein. Diese Phase wird durch den akustischen Hinweis „Die Adaptationsphase beginnt“ eingeleitet.

Während der ‚Testphase‘ absolviert die Versuchsperson die Sehaufgabe, wobei der Blick stets auf den Fixationspunkt zu richten ist. Der Ablauf der Testphase ist in Szenen unterteilt, die nacheinander präsentiert werden. Eine Szene bildet die kleinste Versuchseinheit. Sie enthält ein Versuchsbild, welches entsprechend den Bedingungen der Signaldektionstheorie (vgl. Abschnitt 4.2.3) entweder ein Sehobjekt (Testreiz) oder kein Sehobjekt (Nullbedingung) nebst Fixationspunkt und Bewertungsfeld enthält. In jeder Szene wird, unabhängig davon ob ein Testreiz oder die Nullbedingung gezeigt wird, die Einblendung des (potentiellen) Sehobjektes durch einen Signalton akustisch begleitet.

Zur Realisierung der 6 Objekthelligkeiten (Reizstärken) an den jeweils 6 Positionen im Bewertungsfeld werden 36 verschiedene Versuchsbilder (vgl. Abbildung 4-16) mit Reiz benötigt. Mit 5 Wiederholungen pro Reiz und Position sowie 10 zusätzlich dargebotenen Nullbedingungen ergeben sich insgesamt 190 Szenen pro Versuchsreihe. Die Zuordnung der Versuchsbilder zu den einzelnen Szenen einer jeden Versuchsreihe wurde randomisiert, um Korrelationen mit den unabhängigen Variablen zu vermeiden. Da die Apparatur keine zufällige Zuordnung der Bilder zur Versuchslaufzeit vorsah, wurden im Vorfeld für jede Versuchsreihe drei Varianten mit jeweils unterschiedlichen, zufällig erzeugten Bildreihenfolgen erstellt. Den Versuchspersonen wurde per Zufall eine der drei möglichen Varianten zugelost. Die Dauer der Testphase war abhängig von der Antwortgeschwindigkeit der Versuchsperson und betrug maximal 9,5 Minuten. Sie wird durch den akustischen Hinweis „Der Test beginnt“ eingeleitet.

In der ‚Endphase‘ werden das Adaptationsfeld ausgeblendet, versuchsspezifische Instanzen beendet und die erhobenen Detektionsurteile zu den 190 Szenen in einer XML²⁰-Datei gespeichert. Diese Phase dauert ebenfalls nur wenige Sekunden und wird durch den akustischen Hinweis „Der Test ist beendet“ eingeleitet.

4.5.2 Versuchsbedingungen und Testzeichen

Das adaptationsbestimmende Feld wird durch eine rechteckige, $A_{\text{adapt}} = 3,56 \text{ m} \times 1,83 \text{ m}$ (b x h) große, Fläche ($44^\circ \times 24^\circ$) aufgespannt, die sich in einem Abstand von $a = 4,36 \text{ m}$ zum Beobachter befindet (vgl. Abschnitt 4.3.3). Größe und Form dieses Feldes wurden in allen Versuchsreihen konstant gehalten. Für die Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte wurde ein symmetrisch um den Fixationspunkt liegender Flächenbereich festgelegt, der einen Vollwinkel von 20° ($\theta = 10^\circ$) umfasste. Die Gesamtgleichmäßigkeit dieser Fläche betrug nach Korrektur $U_0 = 92,0 \%$ (vgl. Abschnitt 4.3.3).

Das quadratische Sehobjekt hatte in allen Versuchsreihen eine konstante Größe von $\alpha_{\text{Obj}} \approx 19'$. Bezogen auf ein reales Objekt mit 20 cm Kantenlänge entspricht dies einer Beobachtungsentfernung von etwa 36,5 m. Die ursprünglich im Versuchsplan vorgesehene Objektgröße von $\alpha_{\text{Obj}} \approx 11'$ (vgl. Abschnitt 4.2.1) konnte mit der verwendeten Darstellungsmethode bei den gegebenen Größenverhältnissen der Apparatur nicht verwirklicht werden. Das Sehobjekt unterschied sich an jeder Position von seinem homogenen Umfeld nur durch seine Leuchtdichte (achromatische Bedingung), die logarithmisch in 6 Stufen (Reizstärken) variiert wurde. Dabei erschien das Objekt stets im Positivkontrast. Die Darbietungsdauer des Objektes betrug in allen Versuchssituationen $t_{\text{Obj}} = 200 \text{ ms}$.

Abbildung 4-16 zeigt exemplarisch das Versuchsbild bei der Lichtfarbe Mint mit einer vergrößerten Ansicht von Fixationspunkt und einem rechts davon befindlichen Sehob-

²⁰ XML: Extensible Markup Language.

jekt an der Position $\Theta_{\text{Obj}} = +10^\circ$. Zur besseren Fokussierung des Fixationspunktes ist dieser mit horizontalen und vertikalen Peillinien versehen. Wie aus der Detaildarstellung ersichtlich wird, beziehen sich die Winkelangaben zur Objektpositionen auf den horizontalen Abstand zwischen Fixationspunkt und Objektmitte. Der in der Abbildung erkennbare und unterhalb vom Fixationspunkt radial ausgehende Helligkeitsgradient ergibt sich aus der Gleichmäßigkeitskorrektur, die unter den in der Apparatur gegebenen Bedingungen zu einer gleichförmigen Leuchtdichtevertelung führte. Die untere Schwarzscheitel des Versuchsbildes war der Konstruktion des Aufbaus geschuldet, um das Bild unterhalb der Leinwand zu beschneiden, ohne die Auflösung der Projektion zu beeinflussen.

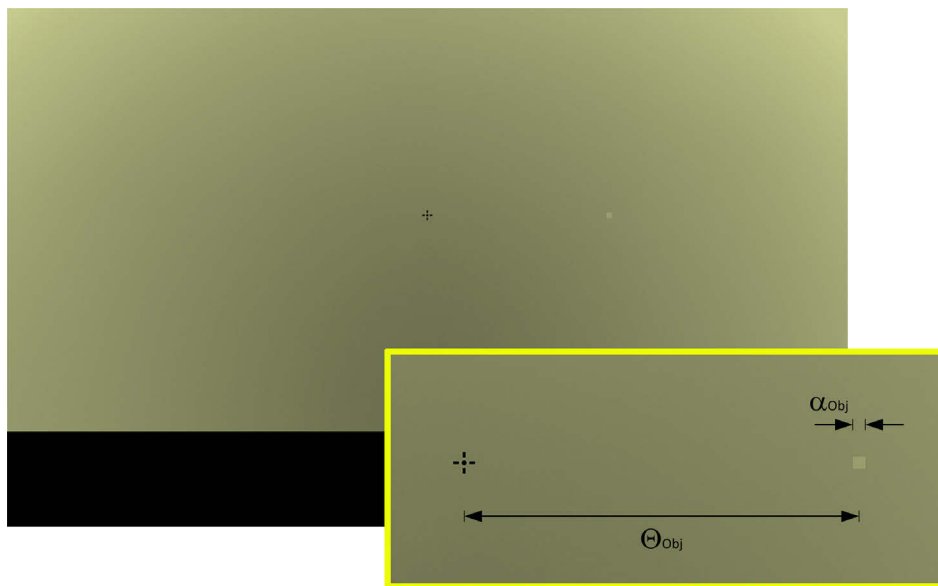


Abbildung 4-16: Versuchsbild bei der Lichtfarbe Mint mit einer Detailansicht von Fixationspunkt und Sehobjekt an Position $\Theta_{\text{Obj}} = +10^\circ$.

Bei den Untersuchungen zu erschwerten Sehbedingungen wurde die jeweils betrachtete Störgröße hinzugeschaltet. In den Regenuntersuchungen erfolgte die Beregnung permanent über die Länge der Versuchsreihe. Die Blendung erfolgte getaktet mit einer Brenndauer von jeweils $t_{\text{BQ}} = 400$ ms zeitlich symmetrisch zum dargebotenen Objekt: Der Einschaltzeitpunkt lag 100 ms vor Einblendung des Sehobjektes und endete 100 ms nach dessen Ausblendung. Die für die Blendquellen eingestellten Farbwertanteile x_{CIE} und y_{CIE} (vgl. Tabelle 4-6 und Tabelle 4-7) entsprachen nahezu den Farbwertanteilen des jeweils zugrundeliegenden Adaptationsfeldes (vgl. Tabelle 4-4).

Mit dem Modell von [ADRIAN 1989] wurde abgeschätzt, dass die in den Versuchen zu erwartenden Unterschiedsschwellen in einer Größenordnung von $\Delta L_{\text{th}} = 10^{-2} \dots 10^{-3} \text{ cd/m}^2$ liegen werden. Gemäß der in Abschnitt 2.1.2 geführten Betrachtung zur Adaptation wird für das experimentelle Vorgehen eine Dunkeladaptationszeit von $t_{\text{adapt}} = 12$ min als ausreichend erachtet. Zudem erfolgte vor jeder Versuchsreihe eine Anpassung an die Versuchsbedingungen von jeweils $t_{\text{adapt,VR}} = 2$ min (vgl. Abschnitt 4.5.1). Eine Zusammenfassung der konstanten Versuchsbedingungen ist in Tabelle 4-9 gegeben.

Tabelle 4-9: Übersicht der konstanten Versuchsparameter.

Symbol	Ausprägung	Beschreibung
α_{Obj}	19' x 19'	Sehobjektgröße
t_{Obj}	200 ms	Darbietungszeit des Sehobjekts
t_{BQ}	400 ms	Leuchtdauer der Blendquellen
φ_{BQ}	wie zugrundeliegendes φ_{adapt}	Lichtfarbe der Blendquellen
$d_{\text{BQ},i}$	vgl. Tabelle 4-5	Aperturdurchmesser der i-ten Blendquelle
$\theta_{\text{B},i}$	vgl. Tabelle 4-5	Blendwinkel der i-ten Blendquelle
I_{R}	vgl. Abschnitt 4.3.5	Regenintensität
a	4,36 m	Beobachterabstand
A_{adapt}	3,56 m x 1,83 m (44° x 24°)	Fläche des Adaptationsfeldes (b x h)
t_{adapt}	12 min	Dunkeladaptationszeit
$t_{\text{adapt,VR}}$	2 min	Adaptationszeit vor jeder Versuchsreihe

4.5.3 Versuchsablauf

Jede Versuchsperson absolvierte in Einzelsitzungen die 22 Versuchsreihen in zufälliger Reihenfolge. Die Vielzahl an Versuchsreihen erforderte eine Aufteilung der Versuchsdurchführung in insgesamt vier Sitzungen zu je zwei Stunden. In Anbetracht eintretender Ermüdungserscheinungen und etwaigem Motivationsverlust bei den Versuchspersonen wird die zeitliche Begrenzung einer Sitzung auf maximal zwei Stunden als hinreichend zumutbar erachtet. Den Versuchspersonen wurden im Vorfeld die Rahmenbedingungen des Versuchs in Form eines Informationsschreibens (vgl. Anhang A.3) mitgeteilt.

Abbildung 4-17 zeigt den schematischen Ablauf einer Sitzung mit Angaben zur Dauer der einzelnen Teilschritte. Der Ablauf unterteilt sich in vorbereitende Maßnahmen und die physiologische Schwellenmessung. Vor dem Eintreffen der Versuchsperson wurden von dem Versuchsleiter die Funktionalität des Systems und die Verdunklung des Versuchstandes geprüft sowie vorbereitende Einstellungen vorgenommen. Beim Empfang wurde die Versuchsperson gebeten ihr Mobiltelefon auszuschalten. Anschließend erfolgte eine kurze Einweisung in den Probandenbereich. Nachdem die Versuchsperson ihre Sitzposition eingenommen und angepasst hatte, wurde der Probandenbereich durch Schließen der Vorhänge verdunkelt. Jede Versuchsperson erhielt in ihrer ersten Sitzung eine Einführung in das Versuchsgeschehen, bei der zunächst die Tastenbelegung des Gamepads (Controllers) erläutert wurde. Im zweiten Teil der Einführung wurde der Versuchsablauf in einer vollautomatisch ablaufenden Präsentation (Tutorial) bei der Adaptationsleuchtdichte von 1,0 cd/m² und einer Lichtfarbe von 4000 K visuell und akustisch vorgestellt und die Sehaufgabe anhand von Beispielen erklärt. Die Erklärung lässt sich in Anhang A.4 nachlesen. Mit dem automatisierten Tutorial wurde für jede Versuchsperson eine identische Einführung in den Versuchsablauf und Beschreibung der Sehaufgabe gewährleistet.

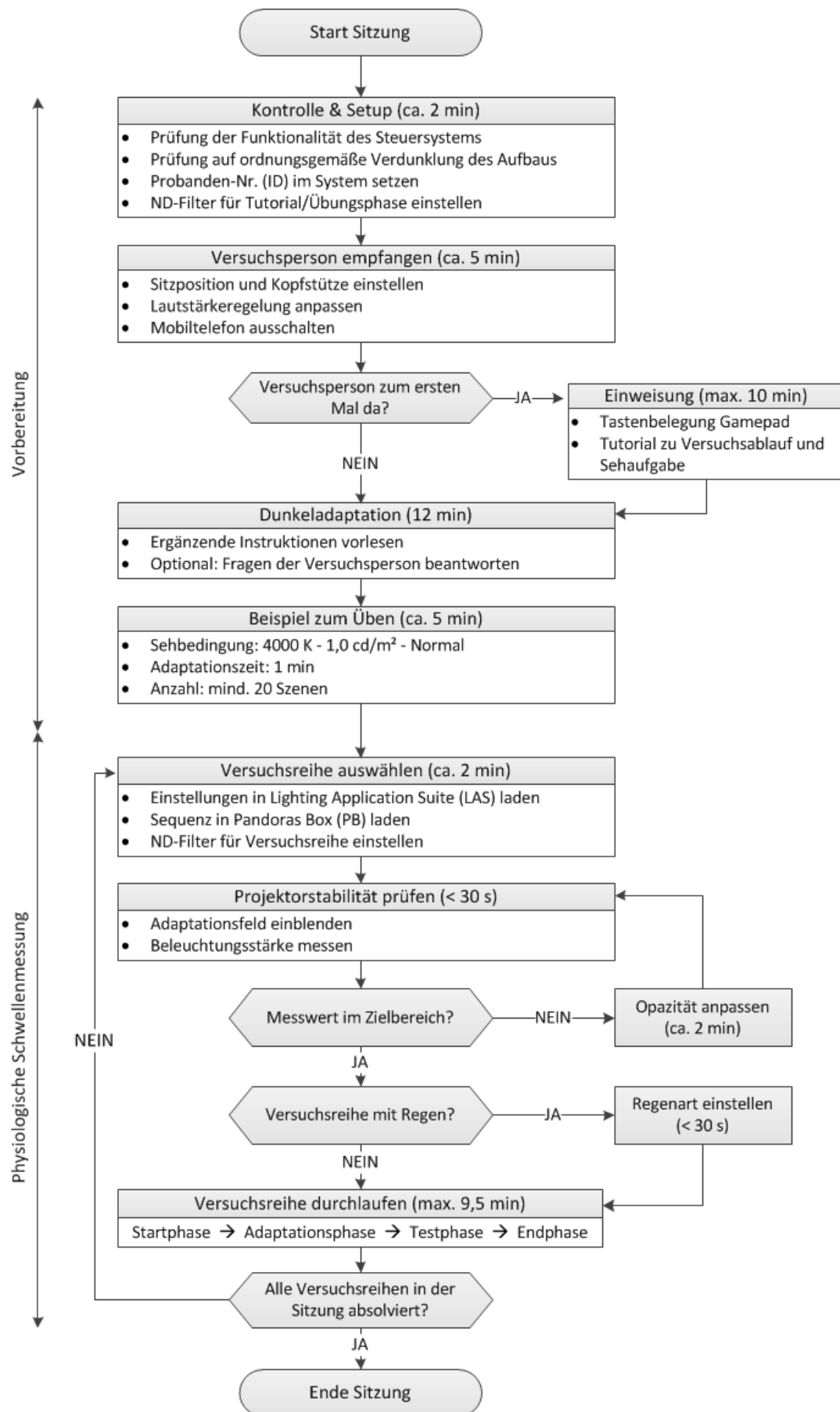


Abbildung 4-17: Ablauf der Versuchssitzung.

Nach dem Empfang bzw. nach der Einweisung folgte die Dunkeladaptation mit einer Dauer von 12 min bei dunkelgetasteter Projektion. Die leichte Aufhellung der Leinwand durch das Restlicht des Projektors wurde als unkritisch erachtet, da die hieraus resultierende Leuchtdichte weit unterhalb des kleinsten zu untersuchenden Leuchtdichteebeneaus lag. Während der Dunkeladaptation hatte die Versuchsperson die Möglichkeit, offene Fragen zum Versuchsablauf und der Sehaufgabe mit dem Versuchsleiter zu besprechen. Nach Beendigung der Dunkeladaptation wurde der Ablauf der Versuchsreihe an einem Beispiel bei $L_{\text{adapt}} = 1,0 \text{ cd/m}^2$ und $\varphi_{\text{adapt}} = 4000 \text{ K}$ geübt. Hierdurch konnte sich die Versuchsperson auf den Darbietungs- und Antwortrhythmus einstellen. Die Sehaufgabe wurde dabei solange trainiert, bis vom Versuchsleiter ein sicheres Antwortverhalten und ein gefestigter Umgang mit dem Controller erkennbar waren.

Der eigentliche Versuchsteil zur physiologischen Schwellenmessung umfasste je nach Sitzung fünf beziehungsweise sechs Versuchsreihen. Jede Versuchsreihe wurde vom Versuchsleiter in der Mediensteuerung (LAS) und dem Medienserver (PB) ausgewählt und die dazu passende ND-Filterkombination vor dem Projektor eingestellt. Diese Maßnahmen erfolgten bei dunkelgetasteter Projektion, um eine kurzzeitige Dunkeladaptation der Versuchsperson zu bewirken. Zugleich nutzte der Proband diese Zeit als Pause. Vor dem Start der gewählten Versuchsreihe wurde die Betriebsstabilität des Projektors durch eine Beleuchtungsstärkemessung des Adaptationsfeldes überprüft. Hierzu wurde das *Pocket-Lux 2* der LMT LICHTMESSTECHNIK GMBH BERLIN verwendet, dessen Messkopf fest hinter der Projektionswand installiert war. Die Beleuchtungsstärke war an den Leuchtdichtewert des Adaptationsfeldes angeknüpft. Bei Abweichungen von $\Delta E > \pm 5 \%$ zum Ausgangswert wurde die Helligkeit des Adaptationsfeldes über die Opazitätsregelung des Medienservers (vgl. Abschnitt 4.3.6) angepasst.

Die Versuchsperson war angewiesen, ihren Blick bei der Durchführung der Sehaufgabe, d. h. während der Testphase einer Versuchsreihe (vgl. Abschnitt 4.5.1), stets auf den Fixationspunkt zu fokussieren. Bei jeder Szene beurteilte die Versuchsperson per Tastendruck auf dem Controller, ob sie das Objekt hat erkennen können (,Links', ,Rechts') oder nicht (,Nein'). Mit dem Tastendruck wurde die Szene automatisch beendet. Dabei wurde die getätigte Antwort von dem Steuerungssystem aufgezeichnet und zusätzlich akustisch wiedergegeben. Diese akustische Rückmeldung diente der Versuchsperson zur eigenen Kontrolle, indem die Unsicherheit genommen wurde, ob der Tastendruck vom System registriert und die der Wahrnehmung entsprechend richtige Taste betätigt wurde. Eine fälschlicherweise getätigte Antwort konnte durch Zuruf der beabsichtigten Antwort korrigiert werden. Derartige Korrekturen wurden vom Versuchsleiter als Notiz aufgenommen und bei der später durchgeführten Datenvorverarbeitung (vgl. Abschnitt 4.6.1) in den Datenbestand eingepflegt.

Die Versuchsperson hatte pro Szene maximal zwei Sekunden Zeit, um eine Antwort abzugeben. Antwortete sie nicht innerhalb dieses vorgegebenen Zeitfensters, ertönte ein Abbruchkriterium und die Szene wurde als nicht erkannt gewertet.

4.6 Statistische Auswertung

Der statistischen Auswertung standen als Ausgangsbasis insgesamt 704 Dateien im XML-Format zur Verfügung, von denen jede 190 Antworten enthielt. Dies entspricht einem Gesamtdatenbestand von 133.760 Erkennungsurteilen.

Die Auswertung des Datenbestandes wurde in drei Arbeitsschritte unterteilt. Im ersten Auswertungsschritt erfolgte eine Vorverarbeitung der Rohdaten. Im zweiten Schritt folgt die Entwicklung eines Modells, anhand dessen die Leuchtdichteschwellen bestimmt werden. Der letzte Schritt prüft, ob die Unterschiede zwischen den Leuchtdichteschwellen durch die unabhängigen Variablen verursacht werden oder zufälliger Natur sind.

4.6.1 Vorverarbeitung der Rohdaten

Im Rahmen der Vorverarbeitung wurde zunächst eine Korrektur der Rohdaten durchgeführt. Hierbei wurden die in den Versuchen vereinzelt aufgetretenen und vom Versuchsleiter per Notiz erfassten Antwortkorrekturen der Versuchspersonen manuell in die betroffenen XML-Dateien eingepflegt.

Anschließend wurden die korrigierten Rohdaten strukturiert und deskriptiv aufgearbeitet. Diese Bearbeitung erfolgte automatisiert mit *Excel 2010*²¹ von MICROSOFT. Es wurde ein VBA²²-Skript geschrieben, mit dem die XML-Dateien sukzessive eingelesen und den hinterlegten Szenereihenfolgen der Versuchsreihen zugeordnet wurden. Bei der deskriptiven Zusammenführung der Daten wurden die Antworthäufigkeiten (Antwortraten) gemäß dem Antwortschema der Signaldetektionstheorie nach Tabelle 4-2 gebildet.

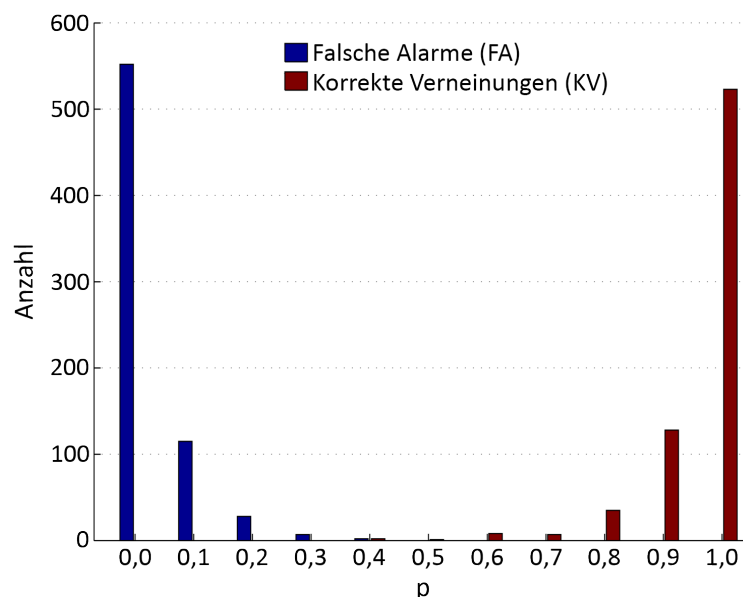


Abbildung 4-18: Häufigkeitsverteilungen der Falschalarmrate (p_{FA}) und der Rate korrekter Verneinungen (p_{KV}).

²¹ Excel Lizenz: Microsoft Office Professional Plus 2010, Version: 14.0.4760.1000.

²² VBA: Visual Basic for Applications.

Zur Abschätzung der Datengüte wird die Nullbedingung (vgl. Abschnitt 4.2.3) ausgewertet. Hierzu zeigt Abbildung 4-18 die Häufigkeitsverteilungen der Falschalarmrate (p_{FA}) und der Rate korrekter Verneinungen (p_{KV}). Die Anzahl falscher Alarme ist bei $p = 0$ am größten und nimmt mit steigender Wahrscheinlichkeit stark ab, d. h., dass von den Versuchspersonen ein nicht vorhandener Reiz nur in wenigen Fällen als Objekt gewertet wurde. Fast achsensymmetrisch dazu liegt die höchste Anzahl korrekter Verneinungen bei $p = 1$ und nimmt mit sinkender Wahrscheinlichkeit stark ab. Dies verdeutlicht, dass ein nicht dargebotener Reiz zumeist auch als solcher detektiert wurde. Aus dieser Betrachtung lässt sich ableiten, dass die Versuchspersonen vorwiegend einen Reiz erkannten, sofern dieser auch wirklich dargeboten wurde. Demnach ist auszuschließen, dass die Versuchspersonen ihre Urteile durch Raten abgegeben haben.

4.6.2 Modell zur Bestimmung der Leuchtdichteschwelle

Zur Bestimmung der Leuchtdichteschwellen wird ein nichtlineares Regressionsmodell verwendet, dessen Funktion in Gleichung 4-1 gegeben ist. Dem Modell liegt eine GAUß-Verteilung zugrunde, die durch Inversion und Skalierung an die Problemstellung angepasst wurde, um den sigmodalen Verlauf der psychometrischen Funktion zu approximieren (vgl. Abschnitt 4.2.3). Die Modellgleichung enthält die Detektionswahrscheinlichkeit (p) als abhängige und die dargebotenen Leuchtdichteunterschiede oder auch Reizstärken (ΔL) als unabhängige Größe. Die Falschalarmrate (p_{FA}) und ein unbekannter Parameter (s) bilden die Funktionskoeffizienten, die im Rahmen der Modelloptimierung geschätzt werden. Die Wertebereiche für die Detektionswahrscheinlichkeit und die Reizstärke ergeben sich aus logischer Betrachtung und dem Untersuchungsgegenstand.

$$p = 1 - (1 - p_{FA}) \cdot e^{\frac{-(\Delta L)^2}{2s^2}} \quad \left| \quad p \in [0,1], \Delta L \in [0,\infty) \right. \quad \text{Gleichung 4-1}$$

Die Berechnung der Leuchtdichteschwelle (ΔL_{th}) ergibt sich durch Umstellen der Modellgleichung und unter Anwendung einer Detektionswahrscheinlichkeit von $p_{th} = 0,5$ (vgl. Abschnitt 2.2). Die Detektionswahrscheinlichkeit umfasst sowohl die Treffer- als auch die Falschalarmrate (vgl. Tabelle 4-2). Um die Schwellendefinition lediglich auf die Trefferrate anzuwenden, ist der Wertebereich der Detektionsrate um die Falschalarmrate zu reduzieren. Gleichung 4-2 zeigt die entsprechende mathematische Formulierung.

$$\begin{aligned} \Delta L_{th} &= \pm s \cdot \sqrt{-2 \cdot \ln \left(\frac{1 - p_{th}}{1 - p_{FA}} \right)} \quad \left| \quad p_{th} = \frac{1 - p_{FA}}{2} + p_{FA} = \frac{1 + p_{FA}}{2} \right. \\ &= \pm s \cdot \sqrt{-2 \cdot \ln \left(\frac{1}{2} \right)} \\ &\approx \pm s \cdot 1,1774 \end{aligned} \quad \text{Gleichung 4-2}$$

Aus dem Berechnungsverfahren geht hervor, dass sich die Bestimmung der Leuchtdichteschwelle auf die Multiplikation des Funktionskoeffizienten s mit einem konstanten Wert zurückführen lässt. Im Ergebnis führt das Modell zu zwei Lösungen, wobei für die Lösungsmenge der Problemstellung nur das positive Ergebnis in Betracht kommt, da der Untersuchungsgegenstand ausschließlich positive Leuchtdichteunterschiede (Positivkontraste) umfasst (vgl. Wertebereich von ΔL in Gleichung 4-1).

Die Programmierung des hier vorgestellten nichtlinearen Regressionsmodells erfolgte in *MatLab*²³ von MATHWORKS GMBH. Als Eingangsgrößen werden mit den Trefferraten (p_T) für die sechs Reizstärken sowie der Falschalarmrate (p_{FA}) aus der Nullbedingung insgesamt sieben Punktschätzer verwendet. Deren Lageschätzung erfolgte durch Konfidenzintervalle einer unbekannten Wahrscheinlichkeit nach CLOPPER und PEARSON mit einem Konfidenzniveau von $\alpha = 0,95$. Die numerische Optimierung des Modells nutzte die Methode der kleinsten Quadrate, die durch den LEVENBERG-MARQUARDT-Algorithmus implementiert wurde. Dieser Algorithmus ist robust gegenüber ungünstig gewählten Startbedingungen. Es konnten daher die Anfangswerte des Optimierungsproblems fixiert werden, wodurch für die Auswertung der einzelnen Versuchssituationen wiederholt identische Bedingungen geschaffen wurden. Aus logischen Gründen wurde der untere Wertebereich der mit dem Modell zu schätzenden Falschalarmrate auf $p_{FA} = 0$ begrenzt. Für die Lageschätzung der Regression wurde ein Konfidenzschlauch bestimmt, dessen obere und untere Grenze auf Basis des Konfidenzniveaus von $\alpha = 0,95$ berechnet wurden. Die Qualität der Modellanpassung wurde mit dem korrigierten Bestimmtheitsmaß (R^2_{adj}) beschrieben.

Das implementierte Modell wurde zunächst auf jede der sechs Objektpositionen einer jeden Versuchsreihe bei jeder einzelnen Versuchsperson angewandt. Die hieraus resultierenden Leuchtdichteschwellen werden aufgrund der separaten Betrachtung der Versuchspersonen als Individualschwellen ($\Delta L_{th,ind}$) bezeichnet.

Abbildung 4-19 zeigt exemplarisch die mit dem Regressionsverfahren modellierten, individuellen psychometrischen Funktionen (Kurven) von Versuchsperson-Nr. 24 bei Normalbedingungen mit $\varphi_{adapt} = 4000$ K und $L_{adapt} = 1,0$ cd/m². Rot dargestellt sind die Punktschätzer mit ihren Konfidenzintervallen sowie die Regression mit zugehörigem Konfidenzschlauch (gestrichelte Linien). Der blaue Markierungspunkt kennzeichnet die Lage der Leuchtdichteschwelle, die durch die blau gestrichelten Linien auf die Koordinatenachsen abgetragen wird. Das zur Schwelle zugehörige Konfidenzintervall ergibt sich aus der, auf die Abszisse projizierten, Breite des Konfidenzschlauchs (magenta gestrichelte Linien). Alternativ lassen sich die Konfidenzgrenzen der Leuchtdichteschwelle auch nach Gleichung 4-2 bestimmen, wobei die entsprechenden Konfidenzgrenzen des Funktionskoeffizienten s einzusetzen sind.

²³ MatLab Version: R2014a, 8.3.0.532.

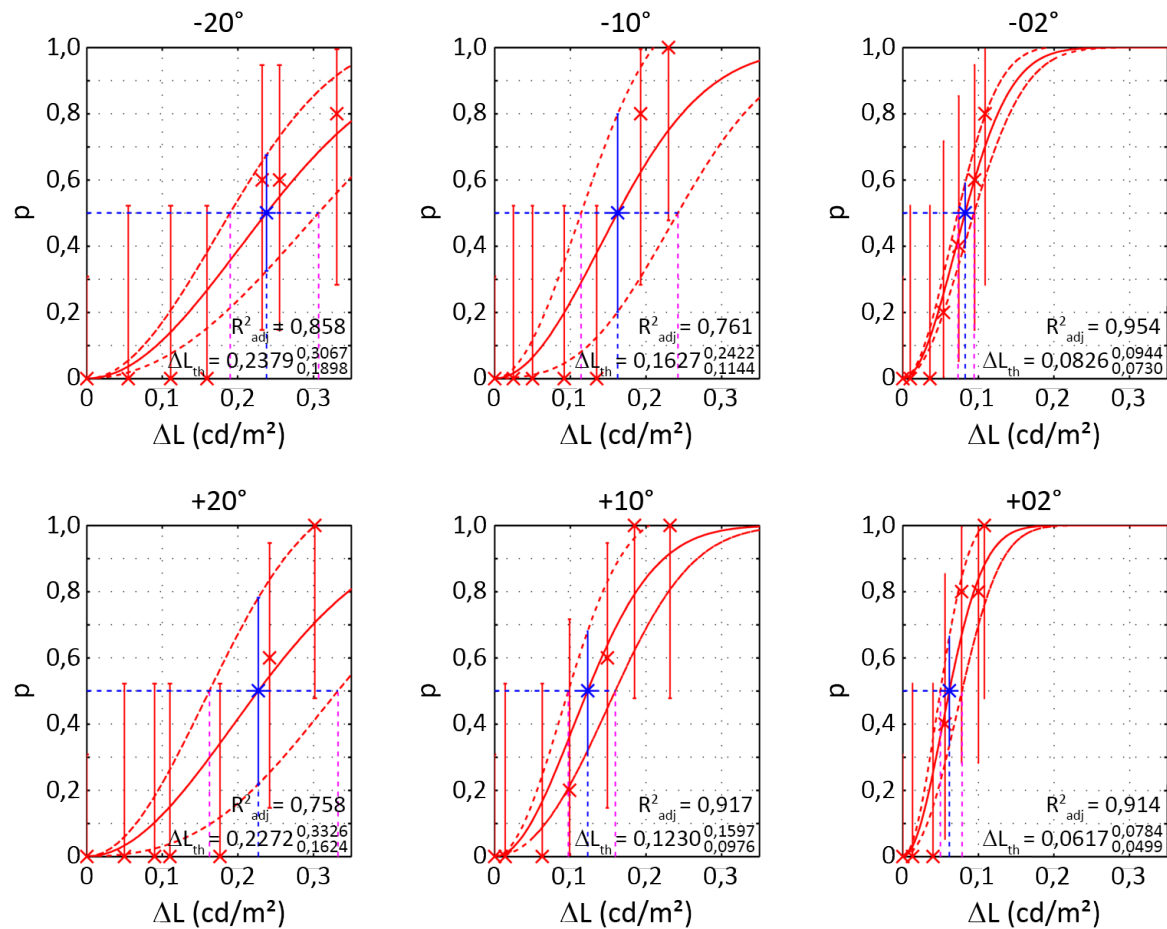


Abbildung 4-19: Psychometrische Kurven von Versuchsperson-Nr. 24 bei Normalbedingungen mit $\varphi_{adapt} = 4000$ K und $L_{adapt} = 1,0$ cd/m² (Individualschwellen).

Der Darstellung ist zu entnehmen, dass sich verhältnismäßig hohe Unsicherheiten bezüglich der Lage der Punktschätzer ergeben, die auf die geringe Datenbasis der einzelnen Versuchsperson zurückzuführen sind. Dies führt in vereinzelt Fällen sogar zu Schwierigkeiten bei der Lösung des Regressionsproblems (Abbildung 4-20).

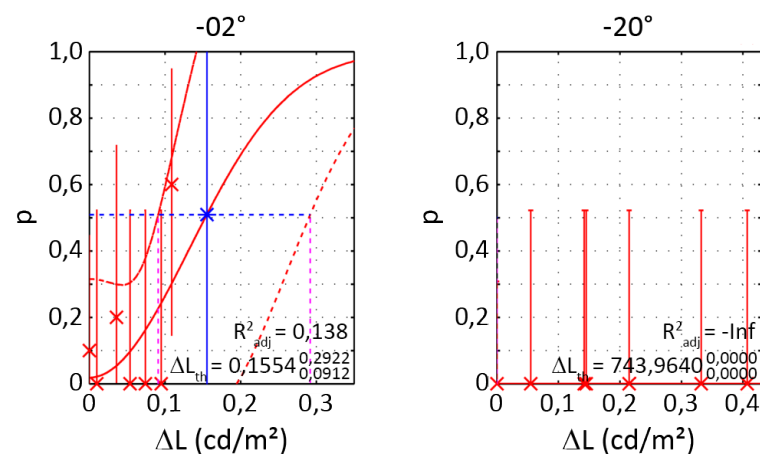


Abbildung 4-20: Probleme des Regressionsmodells bei Individualschwellen: Breite Konfidenzschläuche (links) oder keine Modellbildung (rechts).

Die in Abbildung 4-20 exemplarisch dargestellten Diagramme zeigen die Ergebnisse zweier Versuchspersonen für jeweils eine Objektposition bei normalen Sehbedingungen. Im linken Diagramm ($\varphi_{\text{adapt}} = 4000 \text{ K}$, $L_{\text{adapt}} = 1,0 \text{ cd/m}^2$, $\Theta_{\text{Obj}} = -02^\circ$, VP-Nr. 16) führt der Algorithmus zu einem sehr unpräzisen Modell, das einen auffällig breiten Konfidenzschlauch aufweist. Im Beispiel rechts ($\varphi_{\text{adapt}} = 6000 \text{ K}$, $L_{\text{adapt}} = 1,0 \text{ cd/m}^2$, $\Theta_{\text{Obj}} = -20^\circ$, VP-Nr. 28) erreicht der Algorithmus keine Konvergenz, so dass keine psychometrische Kurve gebildet werden kann. In beiden Fällen liegt die Schwelle der Versuchspersonen höher, als sie mit dem Versuch abgebildet werden konnte. Es wäre daher nicht korrekt, die Daten pauschal als Ausreißer zu werten und von der weiteren statistischen Betrachtung auszuschließen, da sie zur Ergebnismenge beitragen.

Zur Glättung der Daten wurden für jede Versuchsreihe, Objektposition und Reizstärke (Objekthelligkeit) die über das Kollektiv gemittelten Punktschätzer berechnet. Die hieraus resultierenden Leuchtdichteschwellen werden demnach als Kollektivschwellen ($\Delta L_{\text{th,Kol}}$) bezeichnet. Abbildung 4-21 zeigt die nach Anwendung des Regressionsmodells resultierenden psychometrischen Kurven für das Kollektiv. Gegenüber den in Abbildung 4-19 gezeigten Individualschwellen wird eine deutlich höhere Lagepräzision der Punktschätzer erzielt, die sich in Form schmalere Konfidenzschläuche ausdrückt. Daher werden die Kollektivschwellen für die weiteren Betrachtungen bevorzugt.

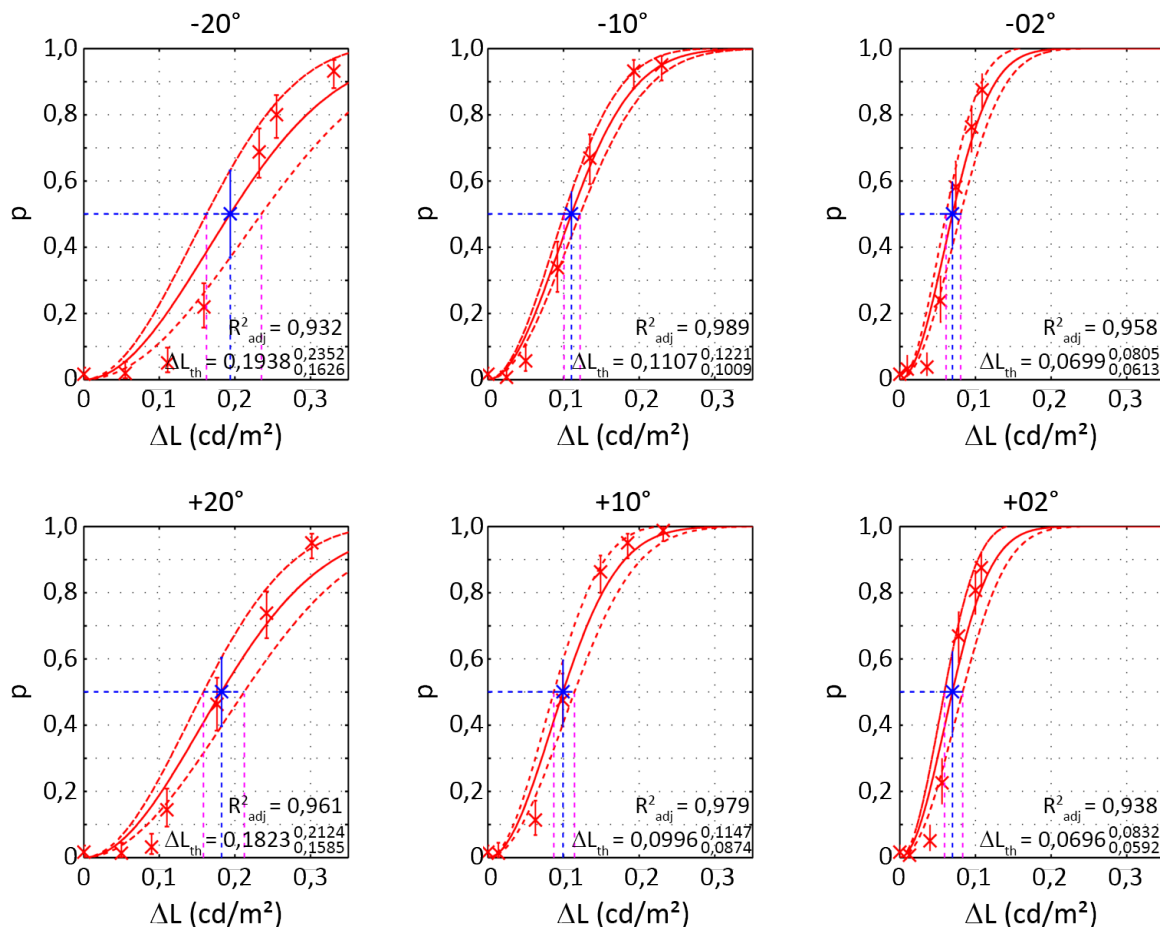


Abbildung 4-21: Psychometrische Kurven aller 32 Versuchspersonen bei Normalbedingungen mit $\varphi_{\text{adapt}} = 4000 \text{ K}$ und $L_{\text{adapt}} = 1,0 \text{ cd/m}^2$ (Kollektivschwellen).

Aus Abbildung 4-21 wird ebenfalls ersichtlich, dass die Verläufe der psychometrischen Kurven und die daraus resultierenden Kollektivschwellen für betragsgleiche Objektpositionen vergleichsweise gut übereinstimmen. Daher wurden in einem weiteren Schritt die Daten betragsgleicher Objektpositionen zusammengefasst, um eine weitere Präzisierung der Kollektivschwellen zu erreichen. Abbildung 4-22 zeigt die hieraus resultierenden Kurven für das vorliegende Beispiel. Wie die in Kapitel 5 enthaltene Ergebnisdarstellung noch zeigen wird, ist diese Zusammenfassung nicht für die Blendungsuntersuchungen möglich.

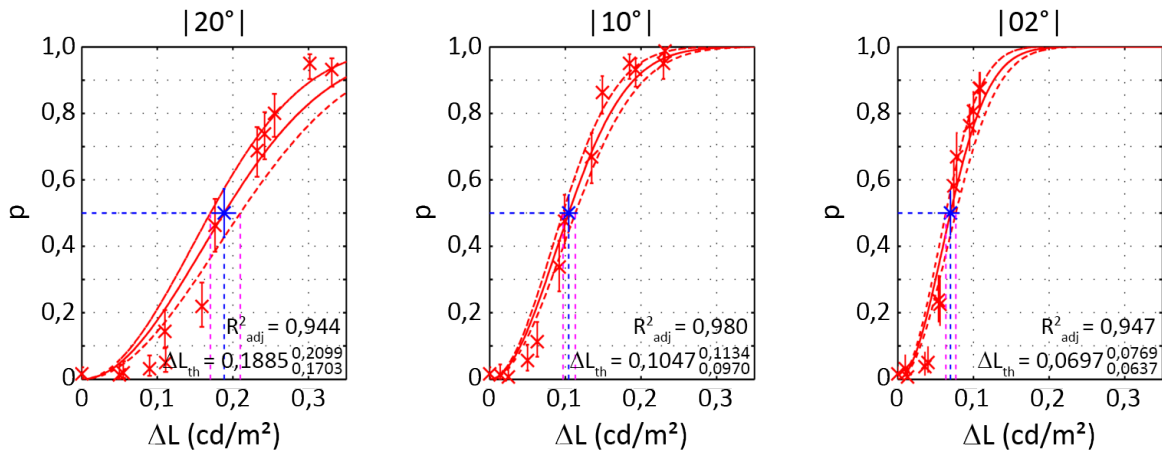


Abbildung 4-22: Psychometrische Kurven aller 32 Versuchspersonen bei Normalbedingungen mit $\varphi_{\text{adapt}} = 4000 \text{ K}$ und $L_{\text{adapt}} = 1,0 \text{ cd/m}^2$ (Kollektivschwellen) für zusammengefasste Objektpositionen.

Die Kollektivschwellen aller Versuchsreihen sowie die zu deren Bestimmung verwendeten Leuchtdichteunterschiede zwischen Sehobjekt und Umgebung sind im Anhang A.1 abgedruckt.

4.6.3 Varianzanalyse und Signifikanzprüfung

Mit der Varianzanalyse (ANOVA²⁴) wird geprüft, ob sich die Unterschiede (Abweichungen) zwischen den Kollektivschwellen durch das Untersuchungsmodell, d. h. die Einflüsse der unabhängigen Variablen (Faktoren), erklären lassen oder ob sie durch nicht erklärbare, d. h. zufällige, Einflüsse (Fehlergrößen) hervorgerufen werden [RASCH 2006]. Bei der ANOVA handelt es sich um ein strukturprüfendes²⁵, parametrisches²⁶ Testverfahren, das auf dem Prinzip der Streuungszerlegung basiert und zur Quantifizierung der Abweichungen die Quadratsumme (QS) verwendet. Demnach setzt sich die Gesamtabweichung (QS_{Ges}) der Stichprobendaten additiv aus den erklärten (QS_{Mod}) und zufälligen Abweichungen (QS_{Err}) zusammen (Gleichung 4-3). Die durch das Untersuchungsmodell

²⁴ ANOVA: Analysis of variance (dt. Varianzanalyse).

²⁵ Strukturprüfendes Verfahren: Dient zur Prüfung eines vermuteten Zusammenhangs (Hypothese).

²⁶ Parametrisches Verfahren: Ist ein verteilungsgebundenes Verfahren.

erklärten Abweichungen ergeben sich aus der Summe der faktoriell bedingten Abweichungen (QS_{Fak}), wobei die Faktoren sowohl einzeln (Haupteffekte) als auch in wechselseitiger Beziehung (Interaktionseffekte) betrachtet werden. [BORTZ 2010], [RASCH 2006]

$$QS_{Ges} = QS_{Mod} + QS_{Err} \quad \left| \quad \text{mit: } QS_{Mod} = \sum_{i=1}^n QS_{Fak,i} \right. \quad \text{Gleichung 4-3}$$

Im vorliegenden Fall wurde entsprechend der verwendeten Versuchsvariablen und Kollektivzusammensetzung eine univariate und multifaktorielle Varianzanalyse mit balanciertem²⁷ Stichprobenumfang durchgeführt.

Die Gesamtabweichung (QS_{Ges}) errechnet sich als Summe der quadratischen Abweichungen der einzelnen Kollektivschwellen vom Gesamtmittelwert aller Kollektivschwellen. Für eine faktoriell bewirkte Abweichung ($QS_{Fak,i}$) wird zunächst für jede Faktorstufe des betrachteten Faktors bzw. der betrachteten Faktorkombination die durchschnittliche Kollektivschwelle bestimmt. Die quadratischen Abweichungen dieser Durchschnittsschwellen vom Gesamtmittelwert aller Kollektivschwellen werden aufsummiert und anschließend mit der Anzahl der Faktorstufen der nicht betrachteten Faktoren multipliziert. Mit den Ergebnissen der Gesamt- und erklärten Abweichung ergibt sich die nicht erklärte Abweichung durch Umstellen von Gleichung 4-3 nach QS_{Err} . Je stärker diese unerklärte Abweichung von Null abweicht, desto größer sind die zufälligen Einflüsse.

Aufgrund der Summation wird die Abweichung mit steigender Anzahl an Beobachtungswerten zunehmend größer. Daher erfolgt eine Relativierung mit der Anzahl an Freiheitsgraden (df), die der jeweiligen Betrachtung zugrunde liegen (Gleichung 4-4). Der Index j kennzeichnet die Bezugsgröße, die einem beliebigen Faktor, einer Faktorkombination oder auch dem Fehler entsprechen kann. Die resultierende Größe MQS (mittlere Quadratsumme) entspricht der mittleren quadratischen Abweichung des Schätzers von dem wahren Wert und wird als Varianz bezeichnet.

$$MQS_j = \frac{QS_j}{df_j} \quad \text{Gleichung 4-4}$$

Durch die Verwendung von Kollektivschwellen heben sich die interpersonellen Streuungen im Mittel gegenseitig auf. Um diese dennoch im Rahmen der Varianzanalyse zu berücksichtigen, wurden die Individualschwellen der einzelnen Versuchspersonen nachträglich aus den Daten der Kollektivschwellen geschätzt. Hierzu wird die individuelle Leuchtdichteschwelle als normalverteilte Zufallsvariable angenommen. Sie ergibt sich aus der Verteilungsform unter Anwendung ihres Mittelwertes (μ) und ihrer Standardabweichung (σ) für eine zufällig gewählte Wahrscheinlichkeit. Ihr Mittelwert entspricht der

²⁷ Balancierter Stichprobenumfang: Gleiche Anzahl von Versuchspersonen in allen Versuchsreihen.

Kollektivschwelle. Ihre Standardabweichung berechnet sich nach Gleichung 4-5 aus dem Standardfehler (SE), der wiederum mit Hilfe des, zur Kollektivschwelle zugehörigen, Konfidenzintervalls (CI) aus der Normalverteilung ($\alpha_0 = 5\%$, $df_{VP} = \infty$) geschätzt wird²⁸. Die Schätzung des Standardfehlers ist für den zugrunde liegenden Stichprobenumfang ($n_{VP} = 32$) und die zufällige Auswahl genau genug.

$$\sigma = \sqrt{n_{VP}} \cdot SE = \sqrt{n_{VP}} \cdot \frac{CI}{2 \cdot 1,96} \quad \left| \quad \text{mit: } SE = \left(\frac{CI}{2 \cdot t_{\left(df_{VP}, 1 - \frac{\alpha_0}{2}\right)}} \right) \right. \quad \text{Gleichung 4-5}$$

Die Resultate der Varianzanalyse sind für normale Sehbedingungen in Tabelle 4-10 und für erschwerte Sehbedingungen in Tabelle 4-11 dargestellt. Darin sind die durch das Untersuchungsmodell erklärten Abweichungen aufgeschlüsselt nach den einzelnen Faktoren (QS_{Fak} , MQS_{Fak}) sowie als Summe (QS_{Mod} , MQS_{Mod}) enthalten. Die zuvor beschriebene Schätzung der durch die Versuchspersonen bewirkten Einflüsse (interpersonelle Streuungen) finden sich ebenfalls in dieser Aufstellung wieder. In den Zeilen darunter befinden sich die zufällig bedingte Abweichung (QS_{Err} , MQS_{Err}) und die Gesamtabweichung (QS_{Ges}). Das korrigierte Bestimmtheitsmaß (R^2_{adj}) in der letzten Zeile besagt, dass die Variation der Kollektivschwellen zu 79,2 % (normale Sehbedingungen) bzw. 63,8 % (erschwerte Sehbedingungen) durch das Untersuchungsmodell erklärt wird.

Für die inferenzielle Betrachtung der Ergebnisse verwendet die ANOVA den F-Test. Die im Rahmen dieses Prüfverfahrens bestimmten Werte befinden sich jeweils in den letzten beiden Spalten der Tabellen. Der F-Wert (F) beziffert das Verhältnis der erklärten zur nicht erklärten Varianz. Je größer dieses Verhältnis, desto höher ist der faktoriell bedingte und damit erklärte Einfluss auf die abhängige Variable. Zur Beurteilung der Signifikanz der Ergebnisse wird ein Hypothesentest durchgeführt. Als Bewertungsgröße wird die Irrtumswahrscheinlichkeit (p_{Irr}) verwendet. Sie berechnet sich aus der F-Verteilung unter Verwendung des F-Wertes und den ihm zugrundeliegenden Freiheitsgraden (df_{Fak} , df_{Err}). Die Unsicherheit wird mit einem Signifikanzniveau von $\alpha_0 = 5\%$ festgelegt. Im Falle eines signifikanten Ergebnisses, d. h. einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $p_{Irr} < 0,05$, wird die Nullhypothese²⁹ (H_0) zugunsten der Alternativhypothese³⁰ (H_1) verworfen.

²⁸ Zur Schätzung einer unbekannten Standardabweichung wird eigentlich die t-Verteilung verwendet. Aufgrund des für die Grundgesamtheit gewählten Freiheitsgrades ($df_{VP} = \infty$) geht diese jedoch in eine Normalverteilung über.

²⁹ H_0 : Die in der Grundgesamtheit betrachteten Leuchtdichteschwellen unterschieden sich nicht voneinander.

³⁰ H_1 : Die in der Grundgesamtheit betrachteten Leuchtdichteschwellen unterschieden sich voneinander.

Tabelle 4-10: Ergebnisse der ANOVA für normale Sehbedingungen.

	<i>df</i>	<i>QS</i>	<i>MQS</i>	<i>F</i>	<i>p_{Irr}</i>
Faktoren (Fak):					
Farbe	3	0,09389	0,03130	1,028	0,3793
Helligkeit	2	180,44712	90,22356	2962,340	0,0000
Winkel	2	82,80710	41,40355	1359,417	0,0000
Farbe*Helligkeit	6	1,38786	0,23131	7,595	0,0000
Farbe*Winkel	6	1,60000	0,26667	8,756	0,0000
Helligkeit*Winkel	4	0,88468	0,22117	7,262	0,0000
VP (geschätzt)	63	1,80935	0,02872	0,943	0,6044
Modell (Mod)	86	269,03001	3,12826	102,711	0,0000
Error (Err)	2217	67,52284	0,03046		
Gesamt (Ges)	2303	336,55285			
R^2_{adj}	0,7916				

Tabelle 4-11: Ergebnisse der ANOVA für erschwerte Sehbedingungen.

	<i>df</i>	<i>QS</i>	<i>MQS</i>	<i>F</i>	<i>p_{Irr}</i>
Faktoren (Fak):					
Farbe	1	0,81189	0,81189	33,778	0,0000
Winkel	5	89,90459	17,98092	748,082	0,0000
Blendung	1	3,60019	3,60019	149,783	0,0000
Regen	2	0,01802	0,00901	0,375	0,6874
Farbe*Winkel	5	0,50519	0,10104	4,204	0,0008
Farbe*Blendung	1	0,01814	0,01814	0,755	0,3851
Farbe*Regen	2	0,13942	0,06971	2,900	0,0552
Winkel*Blendung	5	2,83851	0,56770	23,619	0,0000
Winkel*Regen	10	0,30465	0,03047	1,267	0,2432
Blendung*Regen	2	0,25760	0,12880	5,359	0,0048
Farbe*Blendung*Regen	2	0,11929	0,05965	2,482	0,0838
Winkel*Blendung*Regen	10	0,33012	0,03301	1,373	0,1863
VP (geschätzt)	31	0,43425	0,01401	0,583	0,9681
Modell (Mod)	77	99,28186	1,28937	53,643	0,0000
Error (Err)	2226	53,50418	0,02404		
Gesamt (Ges)	2303	152,78604			
R^2_{adj}	0,6377				

Die Gültigkeit der mit diesem Analyseverfahren erzielten Ergebnisse ist nach [RASCH 2006] an vier Voraussetzungen geknüpft, die nachfolgend vorgestellt und überprüft werden:

- Abhängige Variable ist mindestens intervallskaliert:
Die zu bestimmende Leuchtdichteunterschiedsschwelle ist eine metrische Größe, d. h. sie ist kardinalskaliert und erfüllt damit die erste Voraussetzung.
- Normalverteilung des untersuchten Merkmals und der Residuen:
Die Forderung der normalverteilten Grundgesamtheit resultiert aus der parametrischen Eigenschaft des Verfahrens. Gemäß des zentralen Grenzwerttheorems geht die Mittelwertverteilung der Merkmalsausprägungen bei hinreichend großen Stichproben, die derselben Grundgesamtheit entnommen wurden, in eine Normalverteilung über. Für eine ausreichende Stichprobengröße wird häufig ein Wert von $n_{VP} > 30$ angegeben [BORTZ 2010]. Aufgrund der verwendeten Anzahl von 32 Versuchsteilnehmern wird die Gültigkeit des zentralen Grenzwerttheorems und daher auch die Normalverteilung der Daten angenommen.
- Varianzhomogenität der Residuen:
Die Überprüfung der Varianzhomogenität erfolgt grafisch. Hierzu zeigt Abbildung 4-23 ein Streudiagramm, bei dem die auf der Ordinate abgetragenen standardisierten Residuen³¹ für normale (blau) und erschwerte Sehbedingungen (rot) den durch das Modell vorhergesagten, logarithmierten Leuchtdichteschwellen (Abszisse) gegenübergestellt sind.

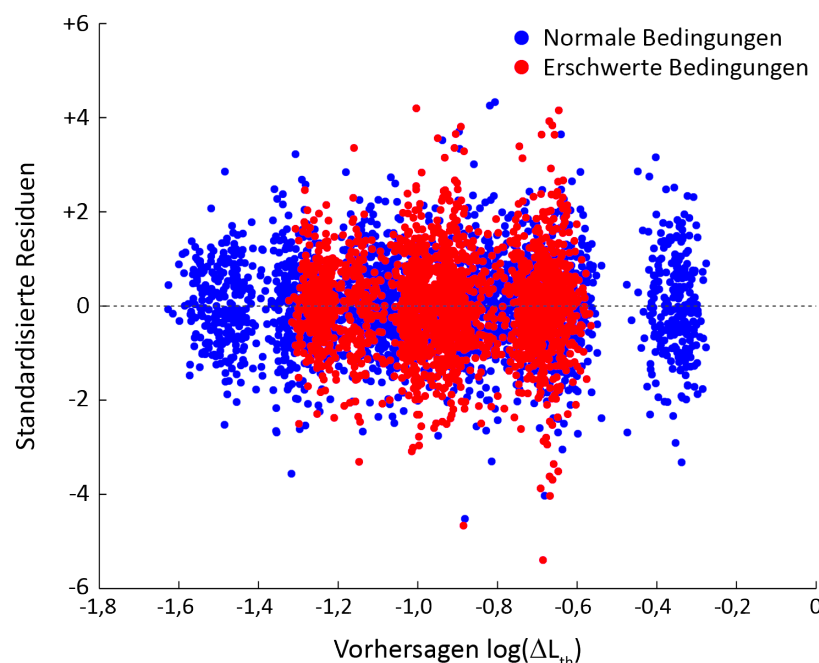


Abbildung 4-23: Varianzhomogenität der standardisierten Residuen.

³¹ Standardisierte Residuen: Absolute Residuen bezogen auf die Quadratwurzel der absoluten erwarteten Häufigkeiten.

Die Residuen zeigen sich nahezu unabhängig von den logarithmischen Schwellen und damit auch unabhängig von den Faktorstufen, wodurch die Forderung der Varianzhomogenität erfüllt ist. Folglich werden bei der weiteren Betrachtung die logarithmierten Werte verwendet.

- Unabhängigkeit der Messwerte:
Der Versuchsplan sieht eine Messwiederholung vor (vgl. Abschnitt 4.2), wodurch sich eine Abhängigkeit zwischen den Messwerten ergibt. Dennoch kann bei der Anwendung der ANOVA von einer unabhängigen Stichprobe ausgegangen werden, weil durch die Verwendung der Kollektivschwellen die Informationen über die Zusammengehörigkeit einzelner Ergebnispaaire nicht mehr verfügbar sind.

Die für die Anwendung der ANOVA erforderlichen Voraussetzungen werden mit den logarithmierten Leuchtdichteunterschiedsschwellen erfüllt. Die Annahmen des zentralen Grenzwerttheorems und die grafische Prüfung der Varianzhomogenität werden als ausreichend betrachtet, zumal sich das Analyseverfahren gegenüber Verletzungen dieser beiden Voraussetzungen als sehr robust erweist [RASCH 2006]. Folglich kann die Gültigkeit der in Tabelle 4-10 und Tabelle 4-11 enthaltenen Ergebnisse bestätigt werden.

Zum Abschluss der Signifikanzbetrachtung werden die Strukturen der angenommenen Alternativhypothesen mit Hilfe eines Post-Hoc-Verfahrens analysiert. Dabei werden die Einflüsse der einzelnen Faktorstufen durch paarweisen Vergleich der Leuchtdichteschwellen untersucht. Als Prüfverfahren wurde der ‚Honest Significant Difference‘-Test (HSD-Test) nach TUKEY angewandt. Das Verfahren ermittelt die kleinste noch signifikante Differenz zwischen den Leuchtdichteschwellen und vergleicht diese mit den tatsächlich vorliegenden Differenzen. Gleichung 4-6 zeigt den mathematischen Zusammenhang zur Bestimmung der *HSD*. Der darin enthaltene kritische Kennwert (q_{krit}) ergibt sich aus der studentisierten Variationsbreite in Abhängigkeit des gewählten Signifikanzniveaus (α_0), der Anzahl der zu vergleichenden Faktoren (n_{Fak}) und den Freiheitsgraden der nicht erklärten Variablen (df_{Err}). [RASCH 2006]

Das Verfahren nach TUKEY liefert sehr kurze simultane Konfidenzintervalle, wodurch es seine hohe Trennschärfe erhält. Diese konservative Eigenschaft reduziert die Wahrscheinlichkeit für den Fehler 1. Art³². Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Signifikanzniveau von $\alpha_0 = 5\%$ gewählt.

$$HSD = q_{krit(\alpha_0, n_{Fak}, df_{Err})} \cdot \sqrt{\frac{MQS_{Err}}{n_{VP}}} \quad \text{Gleichung 4-6}$$

Die Resultate des HSD-Tests sind nicht separat aufgelistet, sondern fließen bei der in Kapitel 5 geführten Ergebnisdiskussion zur Schwellenuntersuchung ein.

³² Fehler 1. Art: Nullhypothese (H_0) wird fälschlicherweise verworfen.

4.7 Fehler- und Messunsicherheitsbetrachtung

Die im Folgenden durchgeführte Betrachtung konzentriert sich vornehmlich auf geometrische und photometrische Unsicherheiten, die zu Abweichungen in den Messergebnissen führen. Im Rahmen der geometrischen Betrachtung werden zunächst die Abweichungen innerhalb des Versuchsbildes bezüglich Größe und Position der Sehobjekte behandelt. Anschließend werden die Positionierungsunsicherheiten der Projektion (des Versuchsbildes) und der Blendquellen abgeschätzt. Die Betrachtung der Leuchtdichte- und Lichtfarbenmessung umfasst sowohl die Unsicherheiten des Messgerätes sowie dessen Positionierung in der Apparatur als auch die Genauigkeit der softwarebasierten Messdatenauswertung. In der abschließenden Zusammenfassung werden die Auswirkungen der Unsicherheiten auf die Soll-Werte der Versuchsparameter diskutiert.

Diese Fehlerbetrachtung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Dem Autor ist bewusst, dass weitere Einflussgrößen existieren, die aufgrund mangelnder Informationslage nicht in die vorliegende Betrachtung einfließen. Hierzu gehören beispielsweise die Unsicherheiten der verwendeten elektronischen Komponenten der Apparatur. So sind bei der Signalübertragung zwischen den Steuerungskomponenten sowie der internen Signalverarbeitung des Projektors Latenzen und Jitter zu erwarten, deren Folgen für den Versuch jedoch als unmerklich erachtet wurden.

Die Erarbeitung der Versuchsmethodik sowie deren Umsetzung und Durchführung erfolgte unter Einbeziehung der bekannten Informationen und in der Überzeugung, umsichtig und richtig zu handeln. Demzufolge wird das Auftreten grober Fehler ausgeschlossen.

4.7.1 Größe und Position der Sehobjekte

Die virtuelle Größe des quadratischen Sehobjekts betrug 13×13 pxl. Hieraus wurde mittels der Pixeldichte der Projektion ($5,4$ pxl/cm) eine Kantenlänge von $2,41$ cm abgeleitet. Dies entspricht einer Größe von $19'$ bei fovealer Betrachtung. Zur Validierung wurden die Kantenlängen des Sehobjekts auf der Leinwand mit Millimeterpapier vermessen. Unter Annahme einer Ablesegenauigkeit von ± 1 mm ergibt sich eine Abweichung der Objektgröße von $\pm 0,79'$. Dies entspricht einer relativen Abweichung von $f_{\text{Obj.Gr}} = 4,2\%$.

Die Positionen der Sehobjekte wurden aus den Konstruktionsdaten des Aufbaus trigonometrisch bestimmt und in das in Abbildung 4-24 gezeigte Testbild überführt. Die Mittelpunkte der Objektpositionen befinden sich in den Schnittpunkten der vertikalen roten und horizontalen blauen Linien. Der Fixationspunkt liegt im Kreuzungspunkt beider blauer Linien. Die Schwarzschilder war der Konstruktion des Aufbaus geschuldet, um das Bild unterhalb der Projektionswand zu beschneiden (vgl. Abschnitt 4.3.3). Die vertikalen

Positionen der roten Markierungslinien des projizierten Testbildes wurden in der Apparatur mit physisch angelegten Sollmarkierungen verglichen, die mittels eines Gliedermaßstabes und Lasermessgerätes (*Disto Basic* von LEICA) abgetragen wurden. Die Lagegenauigkeit dieser Markierungen wird mit ± 10 mm angenommen. Hieraus resultiert eine Abweichung der Objektpositionen (Positionierungsunsicherheit) von gerundet $\pm 0,13^\circ$.

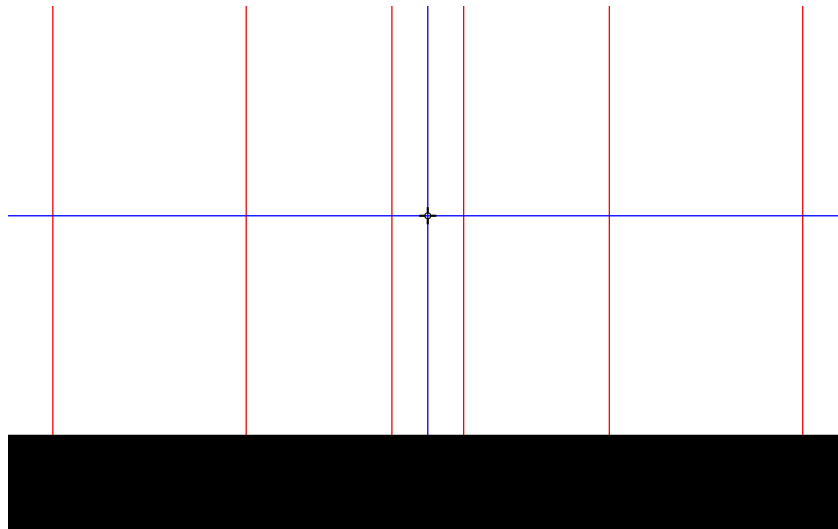


Abbildung 4-24: Testbild zur Validierung der Sehobjektpositionen.

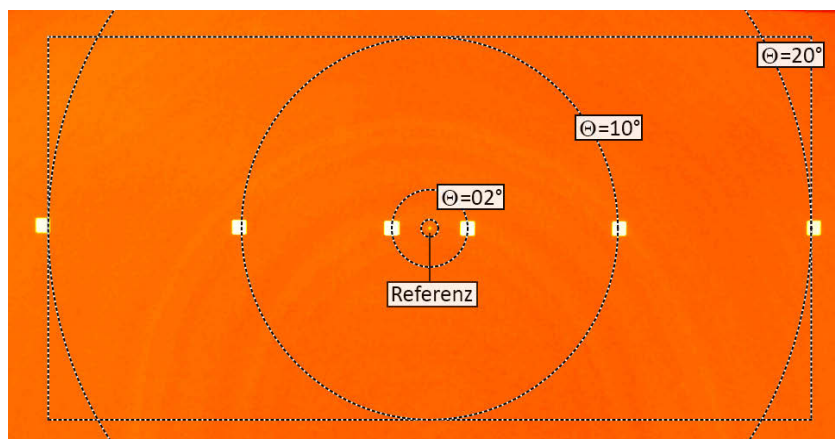


Abbildung 4-25: Validierung der Sehobjektpositionen mittels LMK-Winkeldaten.

Zur Absicherung der Schätzung wurde die Lage der Objektpositionen zusätzlich mit den Winkeldaten der Leuchtdichtemesskamera (LMK) mit 8 mm Objektiv validiert. Hierzu wurde ein weiteres Testbild mit Sehobjekten an allen sechs Position generiert. Abbildung 4-25 zeigt die zugehörige ortsaufgelöste Leuchtdichteaufnahme, auf der neben den sechs Objekten auch der mittig gelegene Referenzpunkt (Laserpunkt) zu erkennen ist, der während der Messung ebenfalls eingeschaltet war. Die kreisförmig angedeuteten Regionen repräsentieren das Winkelraster für 2° , 10° und 20° links- und rechtsseitig des Fixationspunktes. Ihr gemeinsamer Mittelpunkt wurde pixelgenau mit dem Referenzpunkt abgeglichen. An allen Positionen liegt eine deutlich erkennbare Überschneidung der Objekte mit dem jeweiligen Winkelraster vor. Der tendenzielle Anstieg der

Abweichung der Objektposition vom Winkelraster mit zunehmendem Peripheriewinkel wird auf die Verzeichnung der Pixelgröße durch das Weitwinkelobjektiv des Projektors zurückgeführt. Die Messung bestätigt visuell die zuvor geschätzte Positionierungsunsicherheit, die in Abhängigkeit des Winkelbetrags zu Fehlern von 6,5 % ($\theta_{\text{Obj}} = \pm 2^\circ$), 1,3 % ($\theta_{\text{Obj}} = \pm 10^\circ$) und 0,7 % ($\theta_{\text{Obj}} = \pm 20^\circ$) führt. Für die weitere Betrachtung wird mit dem Median der Abweichungen aller Objektpositionen eine mittlere relative Unsicherheit von $f_{\text{Obj.Pos}} = 1,3$ % angenommen.

4.7.2 Ausrichtung von Projektion und Blendquellen

Die Ausrichtung der Projektion (des Versuchsbildes) auf der Leinwand umfasst die genaue Positionierung des Fixationspunktes auf dem Referenzpunkt sowie die Überprüfung der horizontalen Lage.

Der Abgleich zwischen Fixationspunkt des dargestellten Bildes und dem Referenzpunkt erfolgte visuell und wurde durch die elektronisch gesteuerte und verzerrungsfreie Verschiebung des Projektorobjektivs (Lens-Shift) vorgenommen. Aufgrund der hohen Auflösung der Positionssteuerung wird für jede Richtungsachse (x , y) eine maximale Abweichung von ± 2 Pixeln angenommen. Bei der vorhandenen Pixeldichte von 5,4 pxl/cm entspricht dies einer Positionierungsunsicherheit von $\pm 0,37$ cm ($\pm 0,05^\circ$) in jeder Richtung, woraus sich für die Projektion eine quadratische Gesamtpositionierungsgenauigkeit von $\pm 0,52$ cm bzw. $\pm 2,8$ pxl ($\pm 0,07^\circ$) ergibt. Diese Ungenauigkeit wirkt sich einzig auf die Blendwinkel aus und ist daher ausschließlich bei der Unsicherheitsbetrachtung der Blendwirkung zu berücksichtigen. Für den kleinsten Blendwinkel ($\theta_{\text{B,BQ5}} = 2,8^\circ$) wird der relative Fehler maximal und beträgt $f_{\text{B,Proj.Shift}} = 2,5$ %.

Die Abweichung von der horizontalen Ausrichtung lässt sich durch die Neigung des projizierten Bildes um die Blickachse beschreiben. Zu deren Erfassung wurde eine drehbar gelagerte elektronische Laserwasserwaage mit Neigungssensor (*Lasertronic* von SOLA-MESSWERKZEUGE GMBH) verwendet. Ihr Drehpunkt befand sich am Ausgangspunkt der idealen Blickrichtung. Die maximale Messtoleranz beträgt nach Hersteller $\pm 0,15$ mm/m ($\pm 0,0086^\circ$) für den Laser sowie $\pm 0,2^\circ$ für den Neigungsmesser. Der Laserstrahl wurde mit einer eingestellten Neigung von 0° entlang der horizontalen blauen Linie des Testbildes (vgl. Abbildung 4-24) geführt. Unter Annahme einer Abweichung des Laserstrahls von der Linie am linken und rechten Bildrand um maximal ± 15 mm ($\pm 0,2^\circ$) ergibt sich aus der quadratischen Summe der absoluten Einzelabweichungen (Toleranz Laser, Toleranz Neigungsmesser, Treffergenauigkeit auf Linie) eine maximale horizontale Abweichung von $\pm 0,28^\circ$ bzw. $\pm 22,0$ mm. Hieraus resultiert ein Neigungswinkel von $\gamma = \pm 0,71^\circ$, der zu einer Verschiebung der Bildinhalte um $\Delta x = \pm 0,14$ mm ($0,11'$) sowie $\Delta y = \pm 0,07$ mm ($0,06'$) führt. Bezüglich der Größenverhältnisse des Sehobjektes und seiner Positionen wird diese Verschiebung als vernachlässigbar gering erachtet, so dass der durch die Neigung verursachte Gesamtfehler $f_{\text{Proj.Tilt}} = 0$ % mit angenommen wird.

Die Ausrichtung der Blendquellen erfolgte anhand des in Abbildung 4-10 (oben) gezeigten Testbildes, das mit seinem Fluchtpunkt auf den Referenzpunkt ausgerichtet wurde. Aufgrund der schlechteren Zugänglichkeit der Blendquellenpositionen in der Apparatur wird eine Ableseungenauigkeit von ± 6 pxl ($\pm 11,1$ mm) angenommen. Hieraus ergibt sich eine Abweichung von $\pm 0,15^\circ$, die in Abhängigkeit des Blendwinkels (vgl. Tabelle 4-5) zu Fehlern von 5,4 % ($\Theta_{B,BQ5} = 2,8^\circ$), 4,3 % ($\Theta_{B,BQ4} = 3,5^\circ$), 3,2 % ($\Theta_{B,BQ3} = 4,7^\circ$), 2,1 % ($\Theta_{B,BQ2} = 7,0^\circ$) und 1,1 % ($\Theta_{B,BQ1} = 13,7^\circ$) führt.

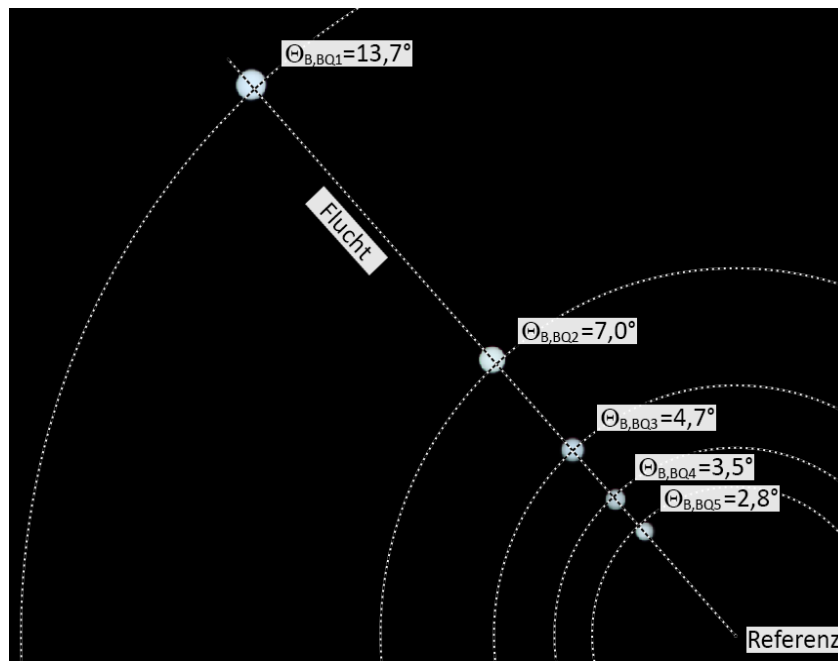


Abbildung 4-26: Validierung der Blendquellenpositionen mittels LMK-Winkeldaten.

Die Validierung der Blendquellenpositionen erfolgte ebenfalls mit dem Winkelraster der LMK. Abbildung 4-26 zeigt das Leuchtdichtebild der fünf Blendquellen bei dunkelgetaster Projektion. Für die Aufnahme wurde ein 25 mm Objektiv verwendet. Die kreisförmig angedeuteten Regionen stellen die in Tabelle 4-5 enthaltenen Blendwinkel bezüglich des Referenzpunkts dar, der sich rechts unten im Bild befindet. Die Messung zeigt, dass die fünf Blendquellen in einer Flucht liegen und von dem jeweiligen Winkelraster geschnitten bzw. tangiert werden. Die angenommene Winkelabweichung wird durch die Messung als bestätigt angesehen. Da keine tendenzielle Abhängigkeit der Abweichung von der Blendquellenposition erkennbar ist, wird der Gesamtfehler als Mittelwert über alle einzelnen Positionsfehler angenommen. Er beträgt $f_{BQ,Pos} = 3,2$ %.

4.7.3 Leuchtdichte- und Lichtfarbenmessung

Für die Messung von Leuchtdichte und Lichtfarbe der einzelnen Versuchssituationen (Adaptationsfeld, Sehobjekte) und Blendquellen wurde die bildauflösende Leuchtdichte- und Farbmesskamera (LMK) verwendet. Die Kamera wurde am Probandenplatz positioniert und ihre Apertur auf den Ausgangspunkt der idealen Blickrichtung ausgerichtet.

Für die Reproduzierbarkeit der Ausrichtung wurde eine mechanische Aufnahme konstruiert, die an den Versuchsstand angekoppelt werden konnte und die Kameraposition in den drei Raumrichtungen (x, y, z) festlegte. Abweichungen von der idealen Blickrichtung durch Drehung und Neigung werden mit jeweils $\pm 1^\circ$ angenommen. In dieser Größenordnung ist aufgrund des gegebenen Leuchtdichtefaktors der Projektionswand (vgl. Tabelle 4-3) kein nachhaltiger Einfluss auf die Messung zu erwarten. Folglich wird die Gesamtpositionierungsgenauigkeit der Messkamera als vernachlässigbar eingestuft und ein relativer Fehler von $f_{\text{LMK,Pos}} = 0,0 \%$ angenommen.

Zur Bestimmung der Messdaten wurden Leuchtdichtebilder für jede Versuchssituation aufgenommen. Die verwendeten Messparameter sind in Tabelle 4-12 gelistet. Zur Verminderung von Rauscheinflüssen und zur Glättung der Lichtquellendynamiken wurde der Aufnahmetyp ‚MultiPic‘ gewählt.

Tabelle 4-12: Messparameter der LMK.

Messparameter	Messobjekt	
	Adaptationsfeld / Sehobjekt	Blendquellen
Kameratyp	LMK98-3 color	
Objektiv	TT8-06478	TT25-B200275
Brennweite	8 mm	25 mm
Fokussfaktor	1	0,9785 (unendlich)
Graufilter	Keiner	TTF 58-5
Aufnahmetyp	Farb-MultiPic mit 8 Bildern (2 Bilder pro Bewertungsfilter)	
Modulationsfrequenz	60 Hz	
Bewertungsfilter	X1, X2, Z, VL	
Integrationszeit	Variabel (abhängig vom Bewertungsfilter)	
Messabstand	4,36 m (± 2 cm)	
Aufwärmzeit	mind. 60 min	
Umgebungstemperatur	19 °C ± 2 °C	

Die Analyse der Leuchtdichtebilder erfolgte in der Auswertungssoftware *LMK LabSoft*³³ der TECHNO TEAM BILDVERARBEITUNG GMBH unter Anwendung von Messregionen. Laut Empfehlung des Herstellers sollte die Fläche einer jeden Messregion $A_{\text{Mess}} \geq 100$ pxl betragen, um eine hinreichend genaue Berechnung der Messgröße zu erzielen.

Für die Leuchtdichtebestimmung der Sehobjekte wurden pro Objekt viereckige Regionen mit einer Größe von 11 pxl x 10 pxl ($A_{\text{Mess}} = 110$ pxl) angelegt. Die jeweils zugehörige Umgebungsleuchtdichte wurde aus einem Kreisring mit einem Innendurchmesser von 30 pxl und einem Außendurchmesser von 38 pxl ($A_{\text{Mess}} \approx 427$ pxl) um das betrachtete

³³ LabSoft Version: 12.7.23.

Objekt bestimmt. Die Leuchtdichten der fünf Blendquellen wurden aus kreisförmigen Messregionen bestimmt, wobei die kleinste Region einen Durchmesser von 20 pxl (BQ5, $A_{\text{Mess}} \approx 314 \text{ pxl}$) und die GröÖte einen von 37 pxl (BQ1, $A_{\text{Mess}} \approx 1075 \text{ pxl}$) hat.

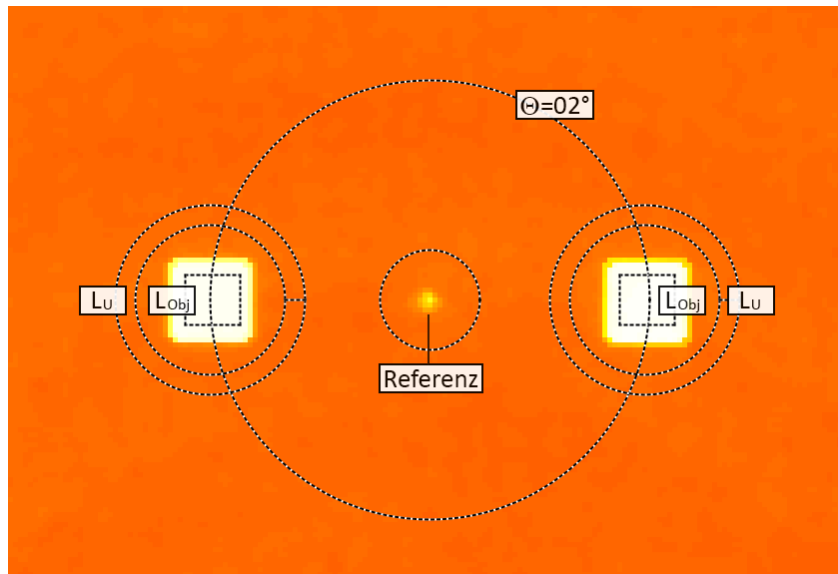


Abbildung 4-27: Form, Größe und Position der Messregionen zur Bestimmung der Leuchtdichteunterschiede zwischen Sehobjekt und Umgebung am Beispiel der Objektpositionen $\Theta_{\text{Obj}} = \pm 2^\circ$.

Abbildung 4-27 zeigt exemplarisch die Messregionen für die Sehobjekte und ihr jeweiliges Umfeld an den Positionen $\pm 2^\circ$. Der helle Punkt in der Mitte ist der mit dem Laser markierte Referenzpunkt, der die Position des Fixationspunktes angibt. Durch die orts aufgelösten Bildinformationen konnten die Regionen pixelgenau an die betrachteten Messobjekte angepasst werden. Dabei wurde ein hinreichend großer Randabstand eingehalten. Es wird daher angenommen, dass bei der Messung der Leuchtdichteunterschiede keine einflussreichen Unsicherheiten vorliegen, die nicht durch den nachfolgend beschriebenen Fehler des Messsystems berücksichtigt werden.

Für die Messkamera (LMK) wird gemäß des Kalibrierzertifikats vom 07. Januar 2013 ein Gesamtfehler von $f_{\text{LMK,ges}} < 10,0 \%$ ausgewiesen. Dieser Wert berücksichtigt die Einzelfehler des Messsystems sowie die Unsicherheit des Kalibriernormals. Davon wird die $v_2(\lambda)$ -Anpassung bei Verwendung des 8 mm Objektivs mit $f_1' = 2,6 \%$, die des 25 mm Objektivs mit $f_1' = 2,4 \%$ beziffert.

4.7.4 Diskussion der Unsicherheiten

Die im Kontext dieser Betrachtung beschriebenen Unsicherheiten sind in Tabelle 4-13 zusammengefasst. Ihre Anwendung auf die Sollwerte führt zu den in der letzten Tabellenspalte enthaltenen Ist-Wertebereichen, die eine Lageschätzung der wahren Parameterwerte darstellen.

Tabelle 4-13: Übersicht der Messunsicherheiten.

Parameter	Sollwert	Unsicherheit	Resultierender Ist-Wertebereich
Sehobjekt:			
Größe	19'	4,2 %	18,21'...19,79'
Position	$\pm 02^\circ$	1,3 %	$\pm(1,97^\circ \dots 2,03^\circ)$
	$\pm 10^\circ$	1,3 %	$\pm(9,87^\circ \dots 10,13^\circ)$
	$\pm 20^\circ$	1,3 %	$\pm(19,74^\circ \dots 20,26^\circ)$
Ausrichtung der Projektion:			
Abstand Fix.- / Referenzpkt.	± 0 pxl	2,5 %	$\pm 2,8$ pxl ($\pm 0,07^\circ$)
Neigung um Blickachse	$\pm 0^\circ$	0,0 %	$\pm 0^\circ$
Ausrichtung der Blendquellen:			
BQ1	13,7°	3,2 %	13,26°...14,14°
BQ2	7,0°	3,2 %	6,78°...7,22°
BQ3	4,7°	3,2 %	4,55°...4,85°
BQ4	3,5°	3,2 %	3,39°...3,61°
BQ5	2,8°	3,2 %	2,71°...2,89°
Photometrie (LMK):			
Leuchtdichte Adaptationsfeld	0,3 cd/m ²	10 %	0,27...0,33 cd/m ²
	1,0 cd/m ²	10 %	0,90...1,10 cd/m ²
	3,0 cd/m ²	10 %	2,70...3,30 cd/m ²
Leuchtdichte je BQ	3285 cd/m ²	10 %	2957...3614 cd/m ²
Lichtfarben	2500 K	10 %	2250...2570 K
	4000 K	10 %	3600...4400 K
	6000 K	10 %	5400...6600 K
	Mint	10 %	k. A.

Die für das Sehobjekt ermittelten Unsicherheiten zur Lageschätzung der wahren Werte von Größe und Positionen werden bezüglich der Einflüsse auf die Detektionsleistung als unkritisch bewertet, da sie aufgrund der gegebenen Größenverhältnisse als gering erachtet werden.

Die absolute Höhe der Adaptationsleuchtdichte variierte betriebsbedingt durch das Leuchtmittel des Projektors, das im Rahmen der definierten Betriebszeit eine maximale Schwankungsbreite von circa 4 % aufwies (vgl. Abschnitt 4.3.2). Mittels Beleuchtungsstärkemessung und bedarfsweise durchgeführter Regulierung der Helligkeit (Opazitätsanpassung) vor jeder Versuchsreihe konnte die Schwankung jedoch kontrolliert werden, so dass stabile Adaptationsbedingungen angenommen werden können. Ebenso wird nicht erwartet, dass die, aufgrund des Gesamtfehlers der LMK geschätzte, Abweichung

zwischen Ist- und Soll-Adaptationsniveau zu merklichen Einflüssen auf den Adaptationszustand der Versuchspersonen und folglich auch deren Detektionsleistung führt.

Die Betriebsstabilität der Störgrößen Blendung und Regen wurde jeweils in den Abschnitten 4.3.4 und 4.3.5 diskutiert und im Rahmen der durchgeführten Versuchsbedingungen als konstant angenommen.

Die Unsicherheit der mit den Blendquellen erreichten physiologischen Blendwirkung ergibt sich aus der kombinierten Betrachtung von Projektions- (Versuchsbild) und Blendquellenausrichtung sowie den Messungen der Adaptations- und Blendquellenleuchtdichten. Da diese Parameter unabhängig voneinander sind, ist es unwahrscheinlich, dass deren maximale Unsicherheiten gleichzeitig auftreten. Folglich kann die Gesamtunsicherheit der Blendwirkung als Wurzel aus der quadratischen Addition der Einzelunsicherheiten bestimmt werden. Ihr Wert beträgt $f_B = 14,7 \%$ und fällt vergleichsweise hoch aus. Hierbei ist zu bedenken, dass der Gesamtfehler der LMK sowohl für die Messung der Adaptations- als auch der Blendquellenleuchtdichte berücksichtigt wurde und daher doppelt in die Berechnung eingeht. Da das doppelte Auftreten des maximalen Gesamtfehlers des Messsystems ebenfalls als sehr unwahrscheinlich bewertet wird, ist davon auszugehen, dass die Gesamtunsicherheit der Blendwirkung unterhalb der gegebenen Schätzung liegt.

Die durch das Regenereignis hervorgerufene Störwirkung definiert sich durch die Niederschlagsart und -menge. Die Niederschlagsmenge ist nicht Bestandteil der Untersuchungen und wird daher an dieser Stelle nicht weiter betrachtet, zumal sie durch die konstruktive Druckstabilisierung des Wasserkreislaufs als gleichwertig für beide untersuchten Regenarten angesehen wird. Für die Differenzierung flüssiger Niederschlagsarten gibt der Hersteller des verwendeten *Laser-Niederschlags-Monitors (Distrometer)* eine Trefferquote von $> 97 \%$ an. Da die visuelle Prüfung der Regenwand den deutlichen Unterschied beider erzielten Regenarten bestätigte, wurden keine Zweifel an der durchgeführten Klassifizierung erhoben.

Zusammenfassend lässt sich aus dieser Betrachtung ableiten, dass die hierin geschätzten Unsicherheiten unabhängig von den Versuchsbedingungen und damit auch von den erklärenden (unabhängigen) Variablen sind.

Diese Annahme stützt sich in geometrischer Hinsicht auf die Auslegung der Versuchsumgebung. Nach der einmaligen Einrichtung und Vermessung der Apparatur, die vor Beginn der Probandenuntersuchungen durchgeführt wurden, waren keine weiteren Umbaumaßnahmen zur Einstellung der verschiedenen Versuchsbedingungen erforderlich (vgl. Abschnitt 4.2.2), die zu einer Veränderung der wahren Werte (Blendquellenpositionen, Regencharakteristik, Position des Referenzpunktes) geführt hätten. Mit der Darstellung von Adaptationsfeld, Sehobjekt und Fixationspunkt in einem virtuell generierten Versuchsbild können Größe und Positionen der Sehobjekte in allen Messwiederholungen sämtlicher durchgeführter Versuchsreihen als konstant angesehen werden. Ebenfalls

können die dargebotenen absoluten Leuchtdichteunterschiede (Reizstärken) zwischen Objekt und Hintergrund für alle Messwiederholungen einer jeden Versuchsreihe als konstant eingestuft werden. Aufgrund der genannten Eigenschaften ist von stabilen Versuchsbedingungen zur Schwellenmessung auszugehen, wodurch eine hohe Reproduzierbarkeit der Versuchsszenen erreicht wird.

In photometrischer Hinsicht stützt sich die Annahme der von den Versuchsbedingungen unabhängigen Unsicherheiten auf die breitbandigen Spektralverteilungen der Lichtfarben von Adaptationsfeld, Sehobjekten und Blendquellen. Das verwendete Messsystem (LMK) wird über Vollfilter an die spektrale Hellempfindlichkeit und die Normspektralwertkurven des 2°-Normalbeobachters angepasst. Lokale Abweichungen dieser Anpassungen sind bei breitbandigen Verteilungen weniger stark gewichtet [TECHNOTeAM 2004], so dass eine vergleichbare Messunsicherheit für alle untersuchten Lichtfarben angenommen werden kann.

Zudem wurden die Darbietungsreihenfolgen der Sehaufgaben randomisiert (vgl. Abschnitt 4.5.1). Folglich kann auch bei der Versuchsdurchführung ausgeschlossen werden, dass die Unsicherheiten mit den unabhängigen (erklärenden) Variablen korrelieren.

Kapitel 5 Ergebnisse und Diskussion zur Schwellenuntersuchung

Die Aufbereitung der Untersuchungsergebnisse erfolgt differenziert nach der Art der jeweils betrachteten Sehbedingung. Hierzu ist das Kapitel in drei Abschnitte gegliedert. Ersterer widmet sich den Detektionsschwellen bei normalen Sehbedingungen, gefolgt von den Regenuntersuchungen im zweiten Abschnitt. Im dritten und letzten Abschnitt sind die Ergebnisse der Blendungsuntersuchung ohne und in Kombination mit den beiden Regenarten enthalten.

Jeder Abschnitt unterteilt sich in einen darstellenden und analytischen Teil. Der Ergebnisdarstellung liegen die Kollektivschwellen zugrunde, die mittels des in Abschnitt 4.6.2 entwickelten Regressionsmodells bestimmt wurden. Die Lageschätzung der Schwellen wird durch 95 %-Konfidenzintervalle angegeben. Es werden Unterschiede zwischen den Schwellen sowie daraus resultierende tendenzielle Abhängigkeiten beschrieben und Auffälligkeiten hervorgehoben. Im analytischen Teil werden die zuvor beschriebenen Tendenzen diskutiert und Erklärungen für deren Entstehung gegeben. Dabei werden die Ergebnisse der Varianzanalyse und Signifikanzprüfung aus Abschnitt 4.6.3 berücksichtigt. Aufgrund der, infolge der ANOVA und Signifikanzprüfung durchgeführten, Logarithmierung der Leuchtdichteschwellen ergeben sich negative Werte. Kleinere Werte bedeuten eine geringere Leuchtdichteschwelle. Bei gleichbleibendem Adaptationsniveau entspricht eine höhere Leuchtdichteunterschiedsschwelle einer verschlechterten Erkennbarkeit der Sehobjekte.

5.1 Leuchtdichteschwelle bei normalen Sehbedingungen

5.1.1 Ergebnisdarstellung

Die Detektionsschwellen unter normalen Sehbedingungen sind in Abbildung 5-1 gezeigt. Auf der logarithmisch skalierten Ordinate sind die Leuchtdichteunterschiedsschwellen (ΔL_{th}) abgetragen. Die Abszisse zeigt die verwendeten Adaptationsniveaus (L_{adapt}). Die untersuchten Lichtfarben werden durch die Farbkodierungen Orange (2500 K), Gelb (4000 K), Grün (Mint) und Blau (6000 K) gekennzeichnet. Ihre Anordnung im Diagramm folgt dem Verlauf einer Farbreihe. Zur besseren Veranschaulichung der Daten wurden

die Detektionsschwellen der Lichtfarben für jedes Leuchtdichteniveau in horizontaler Ausrichtung leicht zueinander verschoben. Die Objektpositionen sind unabhängig von Lichtfarbe und Leuchtdichteniveau durch einen Kreis ($\pm 2^\circ$), ein Dreieck ($\pm 10^\circ$) sowie ein Quadrat ($\pm 20^\circ$) dargestellt. Eine numerische Zusammenfassung der Ergebniswerte wird in Tabelle 5-1 gegeben.

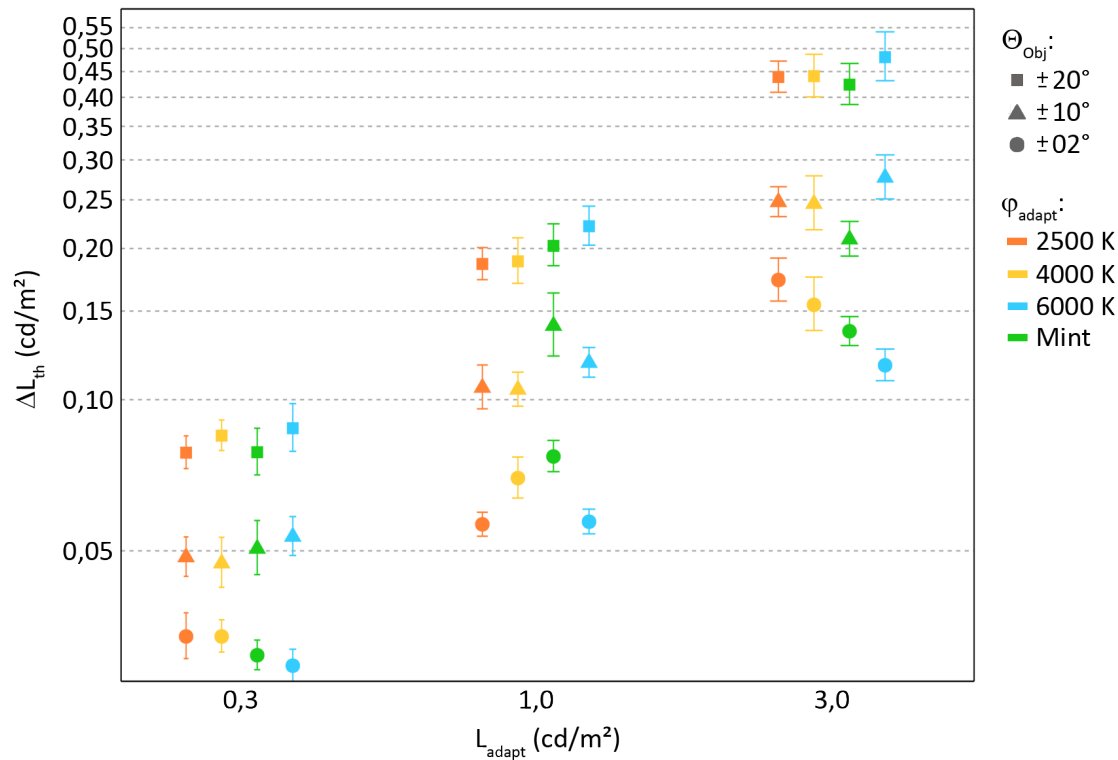


Abbildung 5-1: Leuchtdichteschwellen bei normalen Sehbedingungen.

Die Ergebnisse zeigen einen generellen Einfluss der Adaptationsleuchtdichte und Objektposition auf die Detektionsschwelle. Mit zunehmendem Adaptationsniveau steigt die Leuchtdichteschwelle an. Bei $L_{\text{adapt}} = 0,3 \text{ cd/m}^2$ beträgt die mittlere Leuchtdichteunterschiedsschwelle über alle Objektpositionen und Farben $0,055 \text{ cd/m}^2$ und erhöht sich auf $0,127 \text{ cd/m}^2$ ($L_{\text{adapt}} = 1,0 \text{ cd/m}^2$) bzw. $0,279 \text{ cd/m}^2$ ($L_{\text{adapt}} = 3,0 \text{ cd/m}^2$). Eine vergleichbar starke Erhöhung der Detektionsschwelle ergibt sich, je weiter entfernt das Sehobjekt von der zentralen Sehachse dargeboten wird. Für nahfoveale Objekte ($\Theta_{\text{obj}} = \pm 2^\circ$) beträgt die mittlere Leuchtdichteunterschiedsschwelle über alle Adaptationsniveaus und Lichtfarben $0,081 \text{ cd/m}^2$. In der Peripherie steigt diese auf $0,137 \text{ cd/m}^2$ ($\Theta_{\text{obj}} = \pm 10^\circ$) und $0,243 \text{ cd/m}^2$ ($\Theta_{\text{obj}} = \pm 20^\circ$) an.

Hinsichtlich der Lichtfarbe ist keine einheitliche Wirkung auf die Leuchtdichteschwelle erkennbar. Es zeichnen sich jedoch in Abhängigkeit der Objektposition zwei unterschiedliche Muster ab, die sich bei den drei untersuchten Adaptationsniveaus weitestgehend wiederholen. Die nachfolgend genannten Leuchtdichteschwellen und s/p -Verhältnisse (vgl. Tabelle 4-4) wurden durch Mittelung über die betrachteten Adaptationsniveaus bestimmt.

Für die peripheren Objektpositionen ($\Theta_{\text{Obj}} = \pm 10^\circ$, $\Theta_{\text{Obj}} = \pm 20^\circ$) ergibt sich tendenziell eine Schwellenerhöhung mit ansteigendem s/p -Verhältnis. Bei Anwendung der Lichtfarbe 2500 K ($s/p = 1,097$) wird die geringste Schwelle ($0,184 \text{ cd/m}^2$) erreicht, gefolgt von 4000 K ($s/p = 1,595$) mit $0,185 \text{ cd/m}^2$ und 6000 K ($s/p = 2,026$) mit $0,206 \text{ cd/m}^2$. Bei den Versuchsbedingungen mit der Lichtfarbe Mint ($s/p = 1,481$) wird mit $0,184 \text{ cd/m}^2$ dieselbe Schwelle erreicht wie bei warmweißer Umgebung (2500 K). Allerdings schmälern die im Diagramm erkennbaren Abweichungen die Eindeutigkeit des Ergebnisses. Hier sind insbesondere die entgegengesetzten Abweichungen an der Objektposition $\Theta_{\text{Obj}} = \pm 10^\circ$ für die beiden oberen Adaptationsniveaus ($1,0$ und $3,0 \text{ cd/m}^2$) hervorzuheben.

Bei nahfovealer Objektdarbietung ($\Theta_{\text{Obj}} = \pm 2^\circ$) zeichnet sich tendenziell ein zur peripheren Objektdarbietung inverses Muster ab, d. h. Lichtfarben mit höherem s/p -Verhältnis führen zu einer Reduktion der Leuchtdichteschwelle und damit zu einer verbesserten Wahrnehmung. So wurde bei 2500 K die höchste Schwelle bestimmt ($0,088 \text{ cd/m}^2$), gefolgt von 4000 K ($0,086 \text{ cd/m}^2$), Mint ($0,082 \text{ cd/m}^2$) und 6000 K ($0,068 \text{ cd/m}^2$). Wie bereits bei den peripheren Positionen erkennbar, setzt sich auch im nahfovealen Bereich die Schwelle bei 6000 K deutlich von denen bei den übrigen Lichtfarben ab. Auffällig zeigt sich hierbei das mittlere Adaptationsniveau ($1,0 \text{ cd/m}^2$). Während der Verlauf der Lichtfarben 2500 K, 4000 K und Mint dem Muster peripher dargebotener Sehobjekte ähnelt, ist bei kaltweißem Adaptationsumfeld (6000 K) eine deutliche Verbesserung der Objektdetektion zu beobachten.

Tabelle 5-1: Leuchtdichteschwellen bei normalen Sehbedingungen.

Sehbedingung	L_{adapt} (cd/m^2)	Θ_{Obj} ($^\circ$)	$\Delta L_{\text{th},2500\text{K}}$ (cd/m^2)	$\Delta L_{\text{th},4000\text{K}}$ (cd/m^2)	$\Delta L_{\text{th},6000\text{K}}$ (cd/m^2)	$\Delta L_{\text{th},\text{Mint}}$ (cd/m^2)
Normal	0,3	± 02	0,0337	0,0337	0,0295	0,0310
		± 10	0,0485	0,0472	0,0533	0,0505
		± 20	0,0784	0,0848	0,0877	0,0785
Normal	1,0	± 02	0,0564	0,0697	0,0571	0,0770
		± 10	0,1056	0,1047	0,1184	0,1404
		± 20	0,1863	0,1885	0,2213	0,2025
Normal	3,0	± 02	0,1729	0,1544	0,1170	0,1367
		± 10	0,2475	0,2455	0,2768	0,2086
		± 20	0,4388	0,4405	0,4808	0,4240

Aus den in Tabelle 5-1 gezeigten Leuchtdichteschwellen lassen sich, bei separater Betrachtung der jeweils untersuchten Leuchtdichteniveaus, direkte Aussagen über Einflüsse von adaptationsbestimmender Lichtfarbe und Objektposition auf die Detektionsleistung ableiten. Für den übergreifenden Vergleich der Detektionsleistungen zwischen den verschiedenen Adaptationsniveaus ist die Leuchtdichteunterschiedsschwelle jedoch nicht ausreichend. Vielmehr ist die Schwelle in Relation zum Standardreiz, d. h. der

Adaptationsleuchtdichte, zu setzen, was zur Anwendung der Kontrastdefinition (vgl. Abschnitt 2.2) führt. Die nach Gleichung 2-2 bestimmten Kontrastschwellen (K_{th}) werden in Tabelle 5-2 dargestellt.

Tabelle 5-2: Kontrastschwellen bei normalen Sehbedingungen.

Sehbedingung	L_{adapt} (cd/m ²)	Θ_{Obj} (°)	$K_{th,2500K}$	$K_{th,4000K}$	$K_{th,6000K}$	$K_{th,Mint}$
Normal	0,3	±02	0,1123	0,1123	0,0983	0,1033
		±10	0,1617	0,1573	0,1777	0,1683
		±20	0,2613	0,2827	0,2923	0,2617
Normal	1,0	±02	0,0564	0,0697	0,0571	0,0770
		±10	0,1056	0,1047	0,1184	0,1404
		±20	0,1863	0,1885	0,2213	0,2025
Normal	3,0	±02	0,0576	0,0515	0,0390	0,0456
		±10	0,0825	0,0818	0,0923	0,0695
		±20	0,1463	0,1468	0,1603	0,1413

Gleichwertige Kontrastwerte bedeuten eine vergleichbare Sehleistung bei der Objekterkennung. Demnach wird beispielsweise für nahfoveal dargebotene Sehobjekte (±2°) bei der Lichtfarbe von 2500 K und den Adaptationsniveaus von 1,0 und 3,0 cd/m² eine nahezu gleichartige Detektionsleistung erzielt. Das bedeutet konkret in diesem Fall, dass eine Anhebung des Leuchtdichteniveaus von 1,0 auf 3,0 cd/m² zu keiner Verbesserung der Sichtbedingungen führt.

Für eine praxisgerechte Anwendung empfiehlt sich die Einführung eines Faktors, der die, unter den verschiedenen Versuchsbedingungen erhobenen, Detektionsleistungen mit einem Wert beziffert und damit eine gute Vergleichbarkeit der Versuchssituationen hinsichtlich deren Wirkung auf die Erkennbarkeit der Sehobjekte ermöglicht. Dieser, nachfolgend als Schwellenfaktor (SF) bezeichnete, Wert wird definiert als das Verhältnis zwischen der Kontrastschwelle der betrachteten Versuchsbedingung (VB) und der Kontrastschwelle einer Referenzbedingung (RB). Gleichung 5-1 veranschaulicht die mathematische Definition des Schwellenfaktors.

$$SF = \frac{\left(\frac{\Delta L_{th(VB)}}{L_{adapt(VB)}} \right)}{\left(\frac{\Delta L_{th(RB)}}{L_{adapt(RB)}} \right)} = \frac{K_{th(VB)}}{K_{th(RB)}} \quad \text{Gleichung 5-1}$$

Für die Festlegung der Referenzbedingung empfiehlt sich ein praxisnaher Bezug. Aufgrund der in der Praxis verbreiteten Bewertungsmethode radiometrischer Größen mit

der photopischen Hellempfindlichkeit (vgl. Abschnitt 1.1) erscheint es sinnvoll, die Referenz an diese ‚vorherrschende Messsituation‘ anzupassen. Daher wird das höchste der untersuchten Leuchtdichteniveaus ($3,0 \text{ cd/m}^2$) bei der nahfovealen Position ($\pm 2^\circ$) gewählt, weil diese Bedingung am ehesten dem Anwendungsgebiet der photopischen Hellempfindlichkeitskurve entspricht. Für die Lichtfarbe wird mit 4000 K die mittlere der drei verwendeten, weißlichtähnlichsten Farbtemperaturen gewählt. Ihr s/p -Verhältnis aller untersuchten Helligkeitsniveaus (vgl. Tabelle 4-4) entspricht am ehesten dem einer Quecksilberdampflampe; jenem Lampentyp, der vorwiegend bei den physiologischen Untersuchungen zur Erarbeitung der normativen Vorgaben für die Straßenbeleuchtung eingesetzt wurde (vgl. Abschnitt 1.1). Die resultierenden Schwellenfaktoren unter normalen Sehbedingungen sind in Tabelle 5-3 zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 5-3: Schwellenfaktoren bei normalen Sehbedingungen.

Sehbedingung	L_{adapt} (cd/m^2)	θ_{Obj} ($^\circ$)	$SF_{2500\text{K}}$	$SF_{4000\text{K}}$	$SF_{6000\text{K}}$	SF_{Mint}
Normal	0,3	± 02	2,18	2,18	1,91	2,01
		± 10	3,14	3,06	3,45	3,27
		± 20	5,08	5,49	5,68	5,08
Normal	1,0	± 02	1,10	1,35	1,11	1,50
		± 10	2,05	2,03	2,30	2,73
		± 20	3,62	3,66	4,30	3,93
Normal	3,0	± 02	1,12	1,00	0,76	0,89
		± 10	1,60	1,59	1,79	1,35
		± 20	2,84	2,85	3,11	2,75

Der Schwellenfaktor der Referenzbedingung beträgt definitionsgemäß $SF = 1$. Faktoren mit einem Wert $SF > 1$ bedeuteten eine gegenüber der Referenzbedingung reduzierte, solche mit einem Wert $SF < 1$ eine verbesserte Erkennbarkeit der dargebotenen Objekte. Den Ergebnissen zu den Schwellenfaktoren ist zu entnehmen, dass sich die Detektionsleistung betragsgleicher Objektpositionen mit reduzierendem Adaptationsniveau verringert. Ebenfalls wird die zur Peripherie hin, d. h. mit steigendem Objektwinkel, verschlechterte Erkennbarkeit deutlich. Weniger stark ausgeprägt zeigt sich der Einfluss der Lichtfarbe auf die Detektionsleistung.

5.1.2 Diskussion

Abbildung 5-2 zeigt die generelle Wirkung der Adaptationsleuchtdichte auf die Detektionsschwelle. Der Zusammenhang ist höchst signifikant ($p_{\text{Irr}} \leq 0,0001$) und entspricht der in Hypothese H1 formulierten Kausalbeziehung.

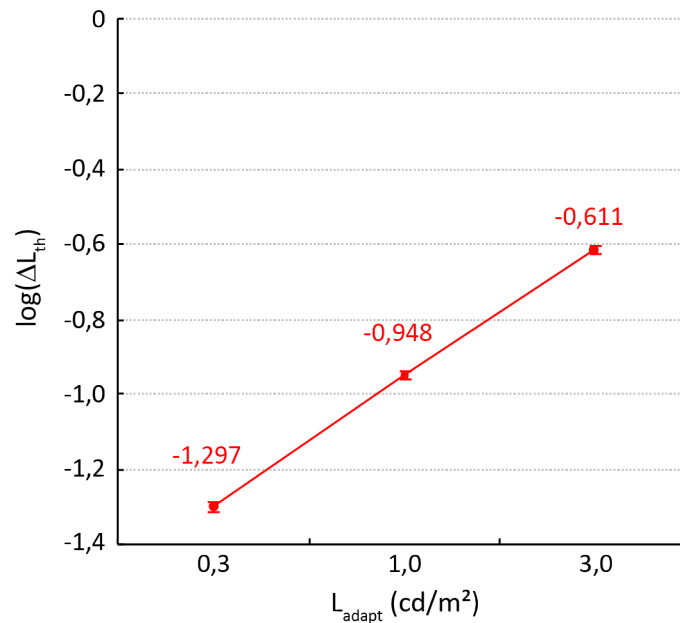


Abbildung 5-2: Genereller Einfluss des Adaptationsniveaus auf die Detektionsschwelle bei normalen Sehbedingungen.

Zum Vergleich mit bisherigen Erkenntnissen zur Erkennbarkeit von Sehobjekten wurden die gemessenen Schwellen mit den aus dem Modell von [ADRIAN 1989] theoretisch bestimmten Werten verglichen. Da das Modell auf fovealen Reizdarbietungen beruht, werden bei der Betrachtung lediglich die Detektionsschwellen der nahfovealen Objekte ($\theta_{\text{Obj}} = \pm 2^\circ$) berücksichtigt. Tabelle 5-4 zeigt die gemessenen sowie die nach dem Modell von ADRIAN bestimmten Schwellen, die deutlich voneinander abweichen. Der Faktor gibt den Unterschied zwischen experimentellen Ergebnissen und Modellwerten an.

Tabelle 5-4: Vergleich der gemessenen Schwellen mit dem Modell von ADRIAN.

L_{adapt} (cd/m^2)	φ_{adapt}	$\Delta L_{\text{th, Messung}} (\theta_{\text{Obj}} = \pm 2^\circ)$ (cd/m^2)	$\Delta L_{\text{th, ADRIAN}} (\theta_{\text{Obj}} = 0^\circ)$ (cd/m^2)	Faktor
0,3	2500 K	0,0337	0,0078	4,32
	4000 K	0,0337	0,0078	4,32
	6000 K	0,0295	0,0078	3,78
	Mint	0,0310	0,0078	3,97
1,0	2500 K	0,0564	0,0162	3,48
	4000 K	0,0697	0,0162	4,30
	6000 K	0,0571	0,0162	3,52
	Mint	0,0770	0,0162	4,75
3,0	2500 K	0,1729	0,0361	4,79
	4000 K	0,1544	0,0361	4,28
	6000 K	0,1170	0,0361	3,24
	Mint	0,1367	0,0361	3,79

Für die untersuchten Lichtfarben nimmt der Faktor, über alle Niveaus gemittelt, Werte von 4,2 (2500 K), 4,3 (4000 K), 3,5 (6000 K) sowie 4,2 (Mint) an. Im Gesamtmittel (über alle Farben und Adaptationsniveaus) sind die experimentellen Daten um einen Faktor von 4,0 höher. Eine mögliche Erklärung für die Unterschiede zwischen dem Modell und den gemessenen Daten sind die unterschiedlichen Objektpositionen (0° gegenüber $\pm 2^\circ$). Weiterhin sind durch die Versuchsmethodik (Lichtfarbe, Spektrum) bedingte Differenzen anzunehmen. Demnach lässt sich der Faktor als Praxisfaktor interpretieren, welcher den höheren Praxisbezug der zugrundeliegenden Versuchsmethodik ausdrückt.

Die generelle Wirkung der Objektposition auf die Objekterkennung ist in Abbildung 5-3 dargestellt. Das Ergebnis ist ebenfalls höchst signifikant ($p_{\text{Irr}} \leq 0,0001$) und führt daher zur Annahme von Hypothese H2. Gegenüber der nahfovealen Position ($\Theta_{\text{Obj}} = \pm 2^\circ$) erhöht sich die über alle Adaptationsniveaus und Farben gemittelte Detektionsschwelle um einen Faktor von 1,7 ($\Theta_{\text{Obj}} = \pm 10^\circ$) bzw. 3,0 ($\Theta_{\text{Obj}} = \pm 20^\circ$).

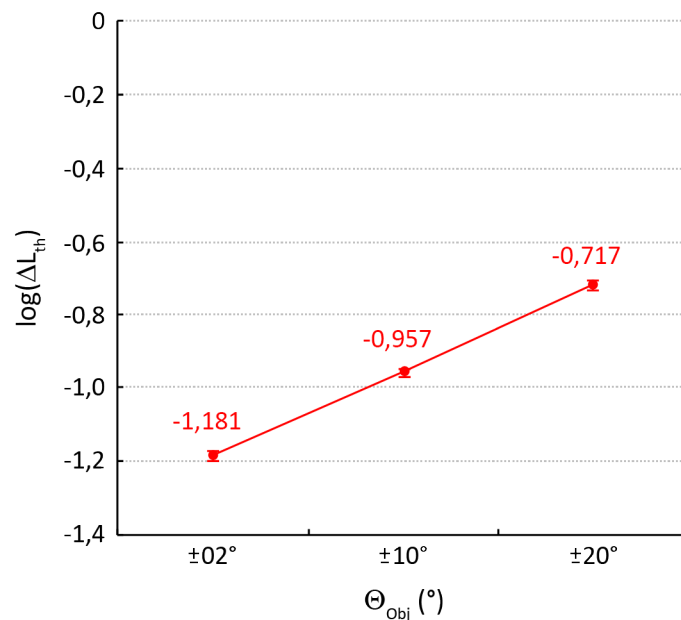


Abbildung 5-3: Genereller Einfluss der Objektposition auf die Detektionsschwelle bei normalen Sehbedingungen.

Zum Vergleich werden die von [FLECK 1988] publizierten relativen Schwellenerhöhungen herangezogen, die sich auf foveal dargebotene Objekte beziehen und Werte von schätzungsweise 2,7 ($\Theta_{\text{Obj}} = \pm 10^\circ$) bzw. 3,1 ($\Theta_{\text{Obj}} = \pm 20^\circ$) annehmen. Während für die Position $\Theta_{\text{Obj}} = \pm 20^\circ$ eine sehr gute Übereinstimmung erzielt wird, ergibt sich bei $\Theta_{\text{Obj}} = \pm 10^\circ$ eine deutlichere Diskrepanz der Faktoren. Eine eindeutige Erklärung für diesen Unterschied konnte nicht gefunden werden, zumal bei FLECK keine genaue Beschreibung der Versuchsbedingungen gegeben wird. Der interpolierte Verlauf der Erhöhungsfaktoren gegenüber der Exzentrizität lässt auf einen exponentiellen Zusammenhang schließen. Dieser Zusammenhang erscheint plausibel, da er dazu führt, dass eine beliebig hohe Schwelle auch bei ausreichend hoher Exzentrizität keine Detektion mehr hervorruft.

Die Annahmen der Hypothesen H1 und H2 entsprechen dem in der Lichttechnik gegenwärtigen Kenntnisstand zur Detektionsleistung und sind wenig überraschend. Sie bestätigen, dass mit der verwendeten Versuchsmethodik ein schlüssiges Ergebnis erzielt werden konnte.

Mit der Lichtfarbe wird keine generell signifikante Wirkung auf die Erkennbarkeit der Sehobjekte nachgewiesen ($p_{\text{irr}} = 0,3793$). Der in Abbildung 5-4 gezeigte Zusammenhang zwischen Lichtfarbe und Leuchtdichteschwelle schwankt geringfügig um einen konstanten Wert. In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass eine generelle Wirkung der Lichtfarbe nicht erwartet wurde. Vielmehr wurden Interaktionseffekte mit dem Helligkeitsniveau (Hypothesen H3 und H4) und der Objektposition (Hypothese H5) angenommen.

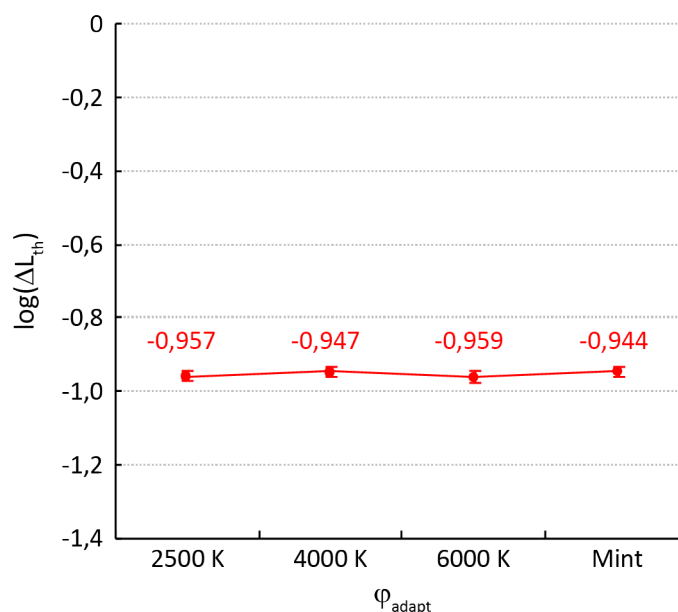


Abbildung 5-4: Genereller Einfluss der Lichtfarbe auf die Detektionsschwelle bei normalen Sehbedingungen.

In Abbildung 5-5 werden die aus den Ergebnissen resultierenden Interaktionseffekte zwischen Lichtfarbe und Adaptationsniveau (links) sowie Lichtfarbe und Objektposition (rechts) mit Wirkung auf die Detektionsschwelle gezeigt.

Für das Helligkeitsniveau $L_{\text{adapt}} = 1,0 \text{ cd/m}^2$ wird bei der Lichtfarbe Mint gegenüber den Weißlichttönen eine hoch signifikant höhere Detektionsschwelle ermittelt ($p_{\text{irr}} \leq 0,004$), wohingegen für die anderen beiden Adaptationsniveaus keine signifikanten Einflüsse der Lichtfarbe auf die Detektionsschwelle nachgewiesen werden. Da sich keine eindeutige Tendenz in Abhängigkeit der Adaptationsleuchtdichte zeigt, können die Hypothesen H3 und H4 nicht bestätigt werden.

Für die Wechselwirkung zwischen Lichtfarbe und Objektposition ergeben sich je nach Objektposition zwei signifikante Unterschiede. So führt die Lichtfarbe von 6000 K bei nahfovealer Objektdarbietung zu einer höchst signifikant geringeren Schwelle gegenüber den anderen Lichtfarben ($p_{\text{irr}} \leq 0,001$), wobei sich für den Unterschied zwischen

4000 K und 6000 K die geringste Irrtumswahrscheinlichkeit ($p_{\text{Irr}} < 0,0001$) ergibt. Bei den Objektpositionen $\Theta_{\text{Obj}} = \pm 10^\circ$ führt eine Farbtemperatur von 4000 K gegenüber 6000 K zu einer signifikant geringeren Detektionsschwelle ($p_{\text{Irr}} = 0,023$). Bei der am weitesten peripher gelegenen Objektposition ($\Theta_{\text{Obj}} = \pm 20^\circ$) wurden keine signifikanten Unterschiede mehr nachgewiesen. Aus der Wechselwirkung zwischen Lichtfarbe und Objektposition wird deutlich, dass ein höherer Anteil kurzwelliger Strahlung im sichtbaren Spektrum bei nahfovealer Betrachtung zu einer Verringerung der Leuchtdichteschwelle führt. Mit Zunahme des Objektwinkels reduzieren sich die Unterschiede und verschwinden schließlich. Dieses Ergebnis überrascht, da eine gegenläufige Entwicklung erwartet wurde. Demzufolge ist auch Hypothese H5 nicht haltbar und muss verworfen werden.

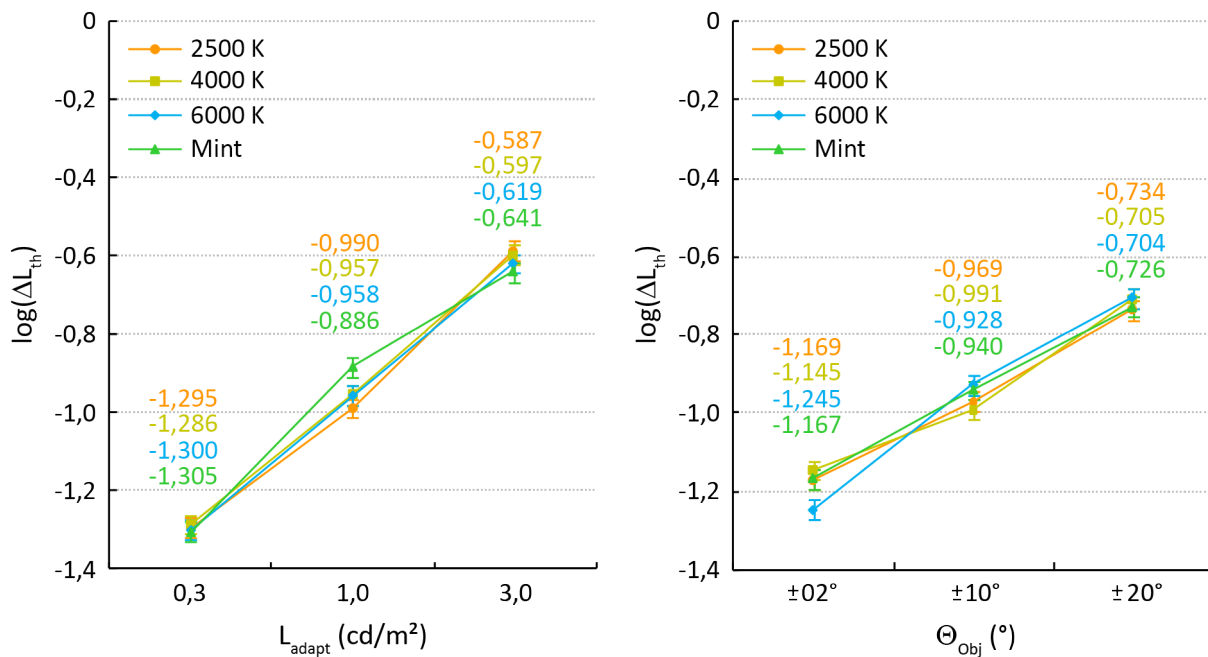


Abbildung 5-5: Einfluss der Wechselwirkungen zwischen Lichtfarbe und Helligkeitsniveau (links) sowie Lichtfarbe und Objektposition (rechts) auf die Detektionsschwelle.

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die Detektionsschwelle tendenziell mit steigendem s/p -Verhältnis der adaptationsbestimmenden Lichtfarbe bei nahfoveal dargebotenen Objekten ab- und bei peripher präsentierten Objekten zunimmt. Diese Umkehr des Detektionsverhaltens in Abhängigkeit von (nah-) fovealer und peripherer Betrachtung korreliert mit dem in Abschnitt 2.1.1 beschriebenen Stäbchen-Zapfen-Verhältnis. Für die Objektposition $\Theta_{\text{Obj}} = \pm 2^\circ$ beträgt das Verhältnis $n_{\text{St/Za}} < 1$, so dass in diesem Fall von einer Dominanz der Zapfen auszugehen ist. In Analogie ist bei einem Verhältnis $n_{\text{St/Za}} > 1$ anzunehmen, dass die Stäbchen den visuellen Wahrnehmungsprozess dominieren.

Im Falle der Stäbchendominanz, d. h. bei peripher dargebotenen Objekten, ist die durchgeführte photometrische Bewertung der Versuchssituation unpassend; sie entspricht der Hellempfindlichkeit der Zapfen und führt gegenüber der skotopischen Bewertung zu einer Untergewichtung kurzwelliger Spektralanteile (vgl. Abbildung 2-4). Es ist daher anzunehmen, dass die realen Adaptationszustände der Testpersonen mit steigendem

s/p -Verhältnis zunehmen. Höhere Adaptationszustände führen zu einer reduzierten Empfindlichkeit des Stäbchenapparates, wodurch die Anhebung der Detektionsschwelle bei Lichtfarben mit einem höheren Anteil kurzwelliger Strahlung erklärt wird. Zur Bekräftigung dieser Annahme wurden die skotopischen Leuchtdichten bestimmt und den photopischen Größen gegenübergestellt (Tabelle 5-5). In der tabellarischen Übersicht sind die Lichtfarben nach aufsteigendem s/p -Verhältnis angeordnet. Die Werte zeigen eine deutliche Abhängigkeit des Adaptationsniveaus von der Lichtfarbe bei rein skotopischer Betrachtung. Vergleichbare Ergebnisse wurden von [BLUMTRITT 2004] beschrieben.

Tabelle 5-5: Photopische und skotopische Leuchtdichten sowie s/p -Verhältnisse der Untersuchungssituationen.

	2500 K	Mint	4000 K	6000 K
L (cd/m ²)	0,300	0,300	0,300	0,300
L' (cd/m ²)	0,317	0,434	0,471	0,595
s/p	1,058	1,446	1,568	1,984
L (cd/m ²)	1,000	1,000	1,000	1,000
L' (cd/m ²)	1,099	1,478	1,578	2,036
s/p	1,099	1,478	1,578	2,036
L (cd/m ²)	3,000	3,000	3,000	3,000
L' (cd/m ²)	3,405	4,560	4,915	6,173
s/p	1,135	1,520	1,638	2,058

Im Falle der Dominanz des Zapfenapparates ergeben sich trotz gleicher Adaptationsleuchtdichten Abhängigkeiten von der Lichtfarbe. Dies bekräftigt die Tatsache, dass die $v_2(\lambda)$ -Bewertung die Hellempfindlichkeit des Auges nicht passend abbildet. Die photopische Bewertung bezieht sich auf ein Gesichtsfeld der Größe 2°, welches retinal vorwiegend von den L- und M- und weniger von den S-Zapfen erschlossen ist. Da die Größe des im Versuch dargebotenen Adaptationsfeldes den Bewertungsbereich von 2° deutlich übersteigt, wodurch auch die S-Zapfen und Stäbchen zunehmend angeregt werden, kommt es zu einer Unterschätzung der kurzwelligen Spektralanteile. Zur genaueren Überlegung wird daher das Stimulationsverhalten der drei verschiedenen Zapfentypen (L, M, S) betrachtet, das unter Verwendung der von [Vos 1978] bestimmten Empfindlichkeitskurven berechnet wurde. Abbildung 5-6 zeigt die relativen Zapfenanregungen in Abhängigkeit der Lichtfarbe mit dem Parameter Adaptationsniveau. Höhere Zahlen lassen auf eine erhöhte Anregung schließen. Die auf der Abszisse abgetragenen Lichtfarben sind entsprechend ihrer s/p -Verhältnisse in aufsteigender Reihenfolge sortiert.

Erwartungsgemäß steigt die Anregung des Zapfenapparates mit höheren Adaptationsniveaus. Da die verwendeten spektralen Empfindlichkeitskurven unabhängig von der Umgebungshelligkeit sind, ergibt sich für jedes untersuchte Helligkeitsniveau ein vergleichbares Muster der relativen Zapfenaktivitäten. Mit steigendem s/p -Verhältnis zeigt

das Stimulationsverhalten der L-Zapfen einen leicht ab- und das der M-Zapfen einen leicht zunehmenden Verlauf. Beide konvergieren bei etwa 4000 K und verlaufen für höhere Farbtemperaturen nahezu identisch und unabhängig von der Lichtfarbe. Hingegen zeigt die Aktivität der S-Zapfen eine deutliche Abhängigkeit von der adaptionsbestimmenden Lichtfarbe. Der mit steigendem s/p -Verhältnis auftretende Anstieg der Aktivität ist wesentlich stärker ausgeprägt. Zudem ergibt sich für die Lichtfarbe Mint eine deutliche Überhöhung der S-Zapfenaktivität. Zur Quantifizierung der Wirkung der untersuchten Lichtfarben auf die einzelnen Zapfentypen wird für jeden Zapfentyp das über alle drei Helligkeitsniveaus gemittelte Verhältnis von maximaler und minimaler Anregung (Anregungsverhältnis) bestimmt. Es beträgt 1,11 (L-Zapfen), 1,18 (M-Zapfen) sowie 3,89 (S-Zapfen). Die Werte verdeutlichen, dass die Aktivität der L- und M-Zapfen nahezu konstant bleibt und einzig die S-Zapfen empfindlich auf die verwendeten Lichtfarben reagieren. Demnach bilden die L- und M-Zapfen die Leistungsträger der visuellen Wahrnehmung im nahfovealen Bereich, wohingegen die Anpassungsmechanismen an verschiedene Lichtfarben maßgeblich über die S-Zapfen getragen werden. Gestützt wird diese Annahme durch die physiologische Eigenschaft, dass nahe der zentralen Sehachse ausschließlich diese beiden Rezeptortypen auftreten (vgl. Abschnitt 2.1.1).

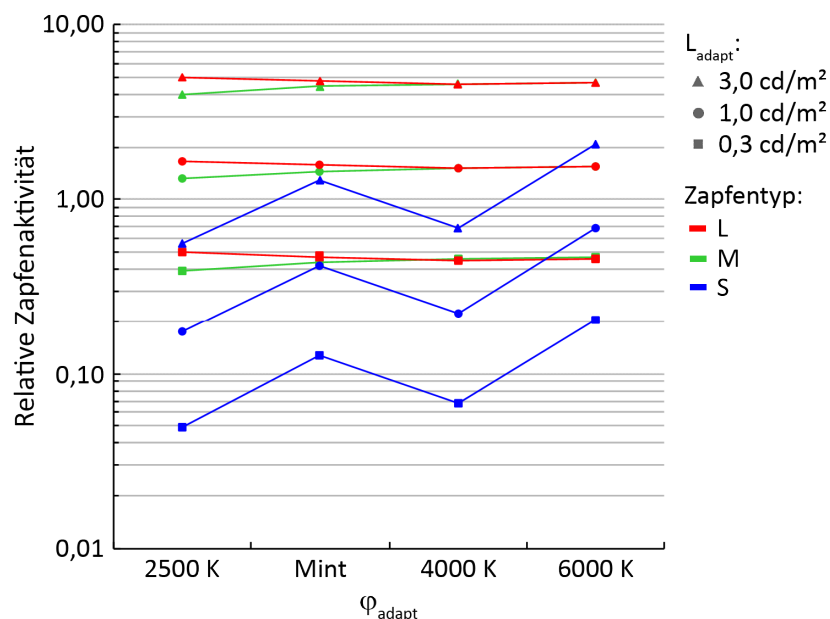


Abbildung 5-6: Zapfenaktivitäten, berechnet nach [Vos 1978].

Für die drei untersuchten Weißlichttöne (2500 K, 4000 K, 6000 K) entspricht der Verlauf der relativen Zapfenaktivität den Erwartungen, die sich aus der logischen Konsequenz der Spektren (Abbildung 4-8) ergeben. So zeigen die L-Zapfen bei 2500 K die höchste Aktivität, während die Anregung der S-Zapfen um eine Größenordnung geringer ausfällt (vgl. Abbildung 5-6). Bei 6000 K haben die L- und M-Zapfen eine vergleichbar hohe Aktivität und die Stimulanz der S-Zapfen befindet sich in derselben Größenordnung. Auffällig sind hingegen die Zapfenreaktionen unter Verwendung der Lichtfarbe Mint. Entgegen einer zu erwartenden Erhöhung des Anregungszustandes der M-Zapfen liegt

die Aktivität dieses Zapfentyps sogar noch geringfügig unterhalb der Anregung der L-Zapfen. Überdies begünstigt diese Lichtfarbe die Stimulation der S-Zapfen.

Ein möglicher Ansatz zur Erklärung der in Abbildung 5-6 gezeigten relativen Zapfenaktivitäten ist die chromatische Adaptation. Sie beschreibt das Bestreben der visuellen Wahrnehmung, den natürlichen Farbeindruck unter verschiedenen Lichtfarben zu erhalten (Farbkonstanz). Hierzu wird die Aussteuerung (Aktivität) der einzelnen Zapfentypen an die vorherrschende Lichtfarbe angeglichen, ohne den aus der Beleuchtungssituation resultierenden (Hell-) Adaptationszustand zu beeinträchtigen. Da sich im vorliegenden Fall die Aktivitäten der L- und M-Zapfen als weitestgehend konstant von den untersuchten Lichtfarben erweisen, steht der chromatischen Adaptation mit der Regelung der S-Zapfenaktivität lediglich ein Freiheitsgrad zur Verfügung. Hiermit lässt sich einerseits die Erhöhung der S-Zapfenaktivität bei steigender Farbtemperatur begründen. Andererseits lässt sich hierdurch auch die Zapfenaktivität bei der Lichtfarbe Mint erklären, deren Farbort sich oberhalb des PLANCK'schen Kurvenzuges befindet (vgl. Tabelle 4-4). Zur Kompensation des Abstandes zwischen diesem Farbort und dem Unbuntpunkt ist die Aktivität der S-Zapfen merklich zu erhöhen und die der M-Zapfen leicht zu reduzieren. In der Fortführung dieser Theorie lässt sich auch eine Begründung für die Detektionsschwellen unter nahfovealen Bedingungen (vgl. Abbildung 5-1) ableiten. Unter der oben beschriebenen Annahme, dass der vorherrschende Adaptationszustand nicht durch die Mechanismen der chromatischen Adaptation beeinträchtigt wird, steigt mit zunehmender Stimulanz der S-Zapfen auch deren Empfindlichkeit. Die hierdurch gesteigerte Empfindlichkeit des visuellen Wahrnehmungsapparates im kurzwelligen Spektralbereich führt bei höheren Farbtemperaturen zu geringeren Leuchtdichteschwellen.

Nach [FAIRCHILD 2005] sind die der chromatischen Adaptation inhärenten psychophysiologischen Prozesse wissenschaftlich noch nicht umfassend verstanden. Aus diesem Grund sei der hier gegebene Erklärungsansatz als abstrakte Theorie aufzufassen, welche durch die bei den Adaptationsniveaus von 0,3 und 3,0 cd/m² (für $\theta_{\text{Obj}} = \pm 2^\circ$) bestimmten Leuchtdichteschwellen gestützt wird. Es sei jedoch angemerkt, dass diese Theorie unvollständig ist, da die bei dem Niveau von 1,0 cd/m² abweichende Tendenz nicht erklärt werden kann. Eine weitere Unterstützung dieses Ansatzes findet sich bei [KOKOSCHKA 1972], der sich in seiner Arbeit unter anderem mit der Zapfenaktivität bei niedrigphotopischen und mesopischen Leuchtdichten befasste. Seinen Ergebnissen zufolge wird die Aktivität der L-Zapfen für abnehmende Leuchtdichten zunehmend gehemmt, während die M-Zapfen bei niedrig photopischen Bedingungen zunächst aktiviert und erst ab mittleren mesopischen Niveaus gehemmt werden. Dieses Ergebnis kann mit den in dieser Arbeit gezeigten Zapfenaktivitäten nicht bestätigt werden. Allerdings gibt KOKOSCHKA auch einen stärker ausgeprägten Verlauf der S-Zapfenaktivität an. Gegenüber den anderen beiden Zapfentypen (L, M) weist der S-Rezeptor bei niedrigphotopischen Bedingungen die höchste Aktivität auf und seine aktive Beteiligung am Sehprozess erstreckt sich bis in niedrige mesopische Bereiche. Dieses Verhalten ist mit den hier vorliegenden Ergebnissen vergleichbar.

5.2 Leuchtdichteschwelle bei Regen

5.2.1 Ergebnisdarstellung

Die unter dem Einfluss von Stark- und Sprühregen bestimmten Leuchtdichteschwellen werden in Abbildung 5-7 gezeigt und den Ergebnissen bei normalen Sehbedingungen gegenübergestellt. Jede der drei dargestellten Bedingungen wurde bei einem Adaptationsniveau von $1,0 \text{ cd/m}^2$ durchgeführt. Die untersuchten Lichtfarben werden durch die Farbkodierungen Orange (2500 K) und Blau (6000 K) gekennzeichnet. Die Objektpositionen sind unabhängig von der Lichtfarbe durch einen Kreis ($\pm 2^\circ$), ein Dreieck ($\pm 10^\circ$) sowie ein Quadrat ($\pm 20^\circ$) dargestellt. Die numerischen Werte der Leuchtdichteschwellen sind in Tabelle 5-6 enthalten.

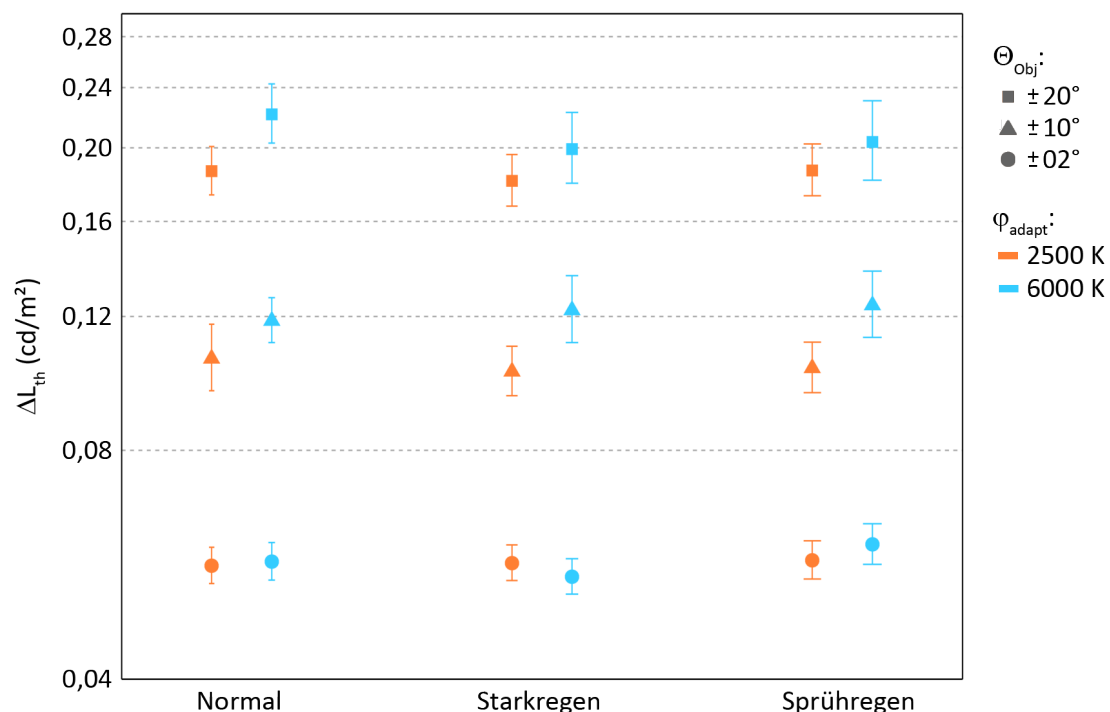


Abbildung 5-7: Leuchtdichteschwellen bei Regen.

Generell betrachtet bewirkt die Störgröße Regen gegenüber normalen Sehbedingungen keine deutliche Veränderung der Leuchtdichteschwelle. Auffällig ist, dass die unter Regeneinfluss bestimmten Schwellen teilweise sogar leicht geringer ausfallen. Dieses unerwartete Ergebnis tritt insbesondere für beide Regenarten bei der Lichtfarbe 6000 K an den Positionen $\Theta_{Obj} = \pm 20^\circ$ auf.

Die Auswirkung der Objektpositionen auf die Detektionsleistung ist, wie auch unter Normalbedingungen, deutlich ausgeprägt. Je weiter das Objekt in der Peripherie gezeigt wird, desto größer ist die zu dessen Erkennbarkeit benötigte Leuchtdichteschwelle.

Der bei Beregnung erzielte Einfluss der Lichtfarbe auf die Objektdetektion ist überwiegend mit den Ergebnissen bei ungestörten (normalen) Sehbedingungen vergleichbar.

Peripher dargebotene Objekte bedingen bei 6000 K höhere Schwellen, d. h. sie sind im Vergleich zu 2500 K schlechter erkennbar. Im Fall der Objektpositionen $\Theta_{\text{Obj}} = \pm 20^\circ$ reduziert sich dieser Einfluss gegenüber Normalbedingungen und aufgrund der Überlappung der Konfidenzintervalle kann kein signifikanter Unterschied mehr angenommen werden. Im Gegensatz dazu ergibt sich für $\Theta_{\text{Obj}} = \pm 10^\circ$ eine deutlichere Differenzierung der Detektionsschwellen zwischen beiden Lichtfarben. Die Konfidenzintervalle liegen bei Stark- und Sprühregen zwar eng beieinander, überlappen sich jedoch nicht, so dass jeweils von einer gerade noch signifikanten Wirkung der Lichtfarbe auf die Detektionsleistung ausgegangen werden kann. Bei nahfovealer Betrachtung ist kein eindeutiger Einfluss der Lichtfarbe erkennbar. So führt die Lichtfarbe 2500 K bei Sprühregen und Normalbedingungen zu einer leicht verbesserten Erkennbarkeit, wohingegen bei Starkregen eine geringere Schwelle mit 6000 K beobachtet wird. Die starken Überlappungen der Konfidenzintervalle lassen jedoch vermuten, dass die geringen Unterschiede zufälliger Natur sind. Im direkten Vergleich beider Regenarten deutet sich an, dass die Detektionsschwelle mit kleiner werdendem Tropfendurchmesser, d. h. für Sprühregen, ansteigt. Dieser tendenzielle Verlauf zeichnet sich für beide Lichtfarben an allen Objektpositionen ab.

Tabelle 5-6: Leuchtdichteschwellen bei Regen.

Sehbedingung	L_{adapt} (cd/m ²)	Θ_{Obj} (°)	$\Delta L_{\text{th},2500\text{K}}$ (cd/m ²)	$\Delta L_{\text{th},6000\text{K}}$ (cd/m ²)
Normal	1,0	± 02	0,0564	0,0571
		± 10	0,1056	0,1184
		± 20	0,1863	0,2213
Starkregen	1,0	± 02	0,0569	0,0546
		± 10	0,1016	0,1223
		± 20	0,1809	0,1992
Sprühregen	1,0	± 02	0,0573	0,0602
		± 10	0,1027	0,1241
		± 20	0,1867	0,2035

5.2.2 Diskussion

Es wurde erwartet, dass sich die Detektionsschwelle durch das Auftreten eines Regenereignisses erhöht (Hypothese H6) und sich ferner eine zunehmende Erkennbarkeitsverschlechterung mit kleinerem Regentropfendurchmesser (Hypothese H7) ergibt. Aus dem in Abbildung 5-8 gezeigten Zusammenhang zwischen Regenart und Detektionsschwelle wird deutlich, dass lediglich geringe Unterschiede zwischen den Schwellen auftreten, die zwar eine tendenzielle Verschlechterung der Erkennbarkeit beim Wechsel von Stark- zu Sprühregen erahnen lassen, der Signifikanzprüfung jedoch nicht standhalten konnten ($p_{\text{Irr}} = 0,6874$). Demnach sind beide Hypothesen zu verwerfen.

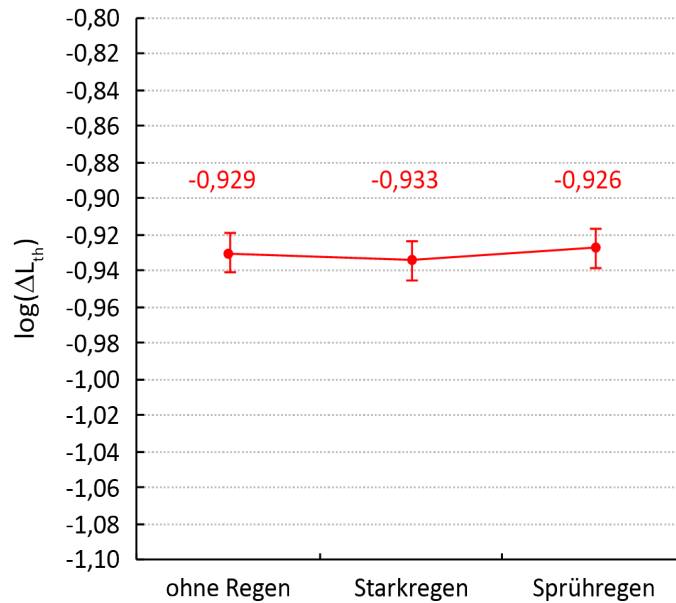


Abbildung 5-8: Genereller Einfluss der Regenart auf die Detektionsschwelle.

Die Erklärung für die ausbleibende Wirkung der untersuchten Regenarten auf die Detektionsschwelle lässt sich einerseits auf die räumliche Ausdehnung der Regenwand in der Apparatur zurückführen. Aus Sicht der Versuchsperson ist die Regenwand mit einer Tiefe von etwa 150 cm verhältnismäßig kurz, so dass davon auszugehen ist, dass die extinktionsbedingten Transmissionsverluste nach Gleichung 2-9 nicht wirksam greifen. Unter realen Bedingungen mit Beobachtungsentfernungen von über 60 m (vgl. Kapitel 2) ist jedoch anzunehmen, dass die Transmissionsverluste nicht mehr zu vernachlässigen sind. Inwiefern hierdurch die Detektionsschwelle verändert wird, kann aus den vorliegenden Ergebnissen nicht abschließend beantwortet werden.

Andererseits war das Regenereignis im Versuch visuell kaum wahrnehmbar. Dies wird auch durch Aussagen der Versuchspersonen gestützt, die meinten, den Regen nicht wirklich erkennen zu können. Als Begründung werden die in der Laboruntersuchung vorherrschenden diffusen Beleuchtungsverhältnisse angeführt, die sich aus der verwendeten Methodik zur Darstellung der Versuchssituationen ergaben und keine ausreichende Aufhellung des Regenereignisses ermöglichten. Es ist daher anzunehmen, dass der beabsichtigte visuelle Rauscheindruck im Umfeld der Versuchspersonen nicht wirkungsvoll war und somit zu keiner Ablenkung von der Sehaufgabe führte. Diese Annahme wird durch die Ergebnisse von [STADLER 1964] untermauert. Seine von ihm verwendete und mit, visuell deutlich wahrnehmbaren, Klarlacktröpfchen präparierte Glasscheibe stellt ebenfalls ein verhältnismäßig kurzes optisch dichtes Medium. Dennoch konnte er eindeutige Schwellenerhöhungen für die nachgestellte Beregnungssituation nachweisen.

Weiterhin können unter realen Gegebenheiten auch Flimmereffekte an den Regentropfen auftreten, die durch direkte Lichtanteile, welche beispielsweise von der ortsfesten Straßenbeleuchtung ausgehen (vgl. Abbildung 2-1), hervorgerufen werden. Infolgedessen kann es u. a. zur Ablenkung und Ermüdung des Beobachters kommen, wodurch die

Detektionsleistung zusätzlich beeinträchtigt wird (vgl. Abschnitt 2.4.2). Da der Versuch ohne diese direkten Lichtanteile durchgeführt wurde (vgl. Abschnitt 4.2.2), kann ein Auftreten derartiger Flimmereffekte nicht angenommen werden.

Die Wechselwirkungen zwischen der Regenart und den untersuchten Lichtfarben zeigt Abbildung 5-9. Das kaltweiße Umfeld (6000 K) führt sowohl unter Normalbedingungen („ohne Regen“) als auch bei Starkregen zu höheren Detektionsschwellen gegenüber den warmweißen Versuchsbedingungen (2500 K). Dagegen ergibt sich bei Sprühregen ein merklich geringerer Einfluss der Lichtfarbe auf die Schwelle. Mit der dort vorhandenen Überlappung der Konfidenzintervalle kann, wenn auch sehr knapp, kein signifikanter Einfluss zwischen Regen und Lichtfarbe ($p_{\text{irr}} = 0,0552$) nachgewiesen werden. Folglich ist Hypothese H8 ebenfalls zu verwerfen. Ungeachtet der fehlenden Signifikanz ist die bei 2500 K stärkere Schwankung der Detektionsschwelle in Abhängigkeit der Regenart gegenüber 6000 K hervorzuheben. Der direkte Vergleich zwischen Stark- und Sprühregen lässt vermuten, dass der Einfluss der Lichtfarbe bei optisch dichteren Medien reduziert wird. Als mögliche Erklärung wird der bei Sprühregen stärker ausgeprägte extraokulare Schleier herangezogen, dessen Wirkung weitaus größer erscheint als die der Lichtfarbe.

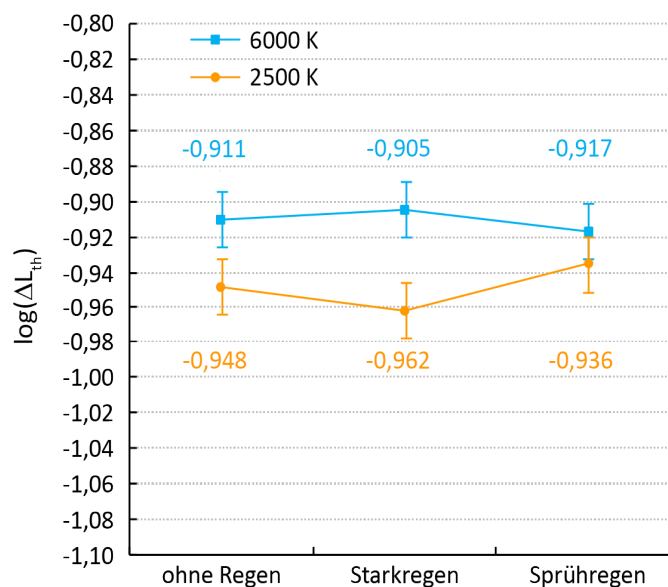


Abbildung 5-9: Einfluss der Wechselwirkung zwischen Lichtfarbe und Regenart auf die Detektionsschwelle.

Zusammenfassend ist davon auszugehen, dass die durch ein reales Regenereignis hervorgerufene Störwirkung nicht vollständig im Labor reproduziert werden konnte und die erzielten Ergebnisse daher den Einfluss des Regens auf die Detektionsleistung unterschätzen. Ein möglicher Verbesserungsvorschlag der Versuchsmethodik wird in Abschnitt 6.2 gegeben. Als positiver Nebeneffekt lässt sich aus der ausbleibenden Wirkung der Regenarten die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse unter Normalbedingungen ableiten; die Schwellen mit und ohne Regen sind tendenziell miteinander vergleichbar.

5.3 Leuchtdichteschwelle bei Blendung

5.3.1 Ergebnisdarstellung

Die unter Blendwirkung bei dem Adaptationsniveau von $1,0 \text{ cd/m}^2$ erhobenen Leuchtdichteschwellen sind in Abbildung 5-10 im direkten Vergleich zu normalen Sehbedingungen gezeigt. Die untersuchten Lichtfarben werden durch die Farbkodierungen Orange (2500 K) und Blau (6000 K) gekennzeichnet. Die Objektpositionen sind unabhängig von der Lichtfarbe durch einen Kreis ($\pm 2^\circ$), ein Dreieck ($\pm 10^\circ$) sowie ein Quadrat ($\pm 20^\circ$) dargestellt. Aufgrund der asymmetrischen Versuchsanordnung der Blendquellen entstehen an betragsgleichen Objektpositionen ungleich starke Blendwirkungen, so dass deren Zusammenfassung hier nicht sinnvoll ist. Es wird daher zwischen links (Blendquellen-seite) und rechts vom Fixationspunkt liegenden Objektpositionen unterschieden, die im Diagramm mit unausgefüllten (links) und gefüllten Markern (rechts) symbolisiert werden. Die numerischen Werte der Detektionsschwellen zeigt Tabelle 5-7.

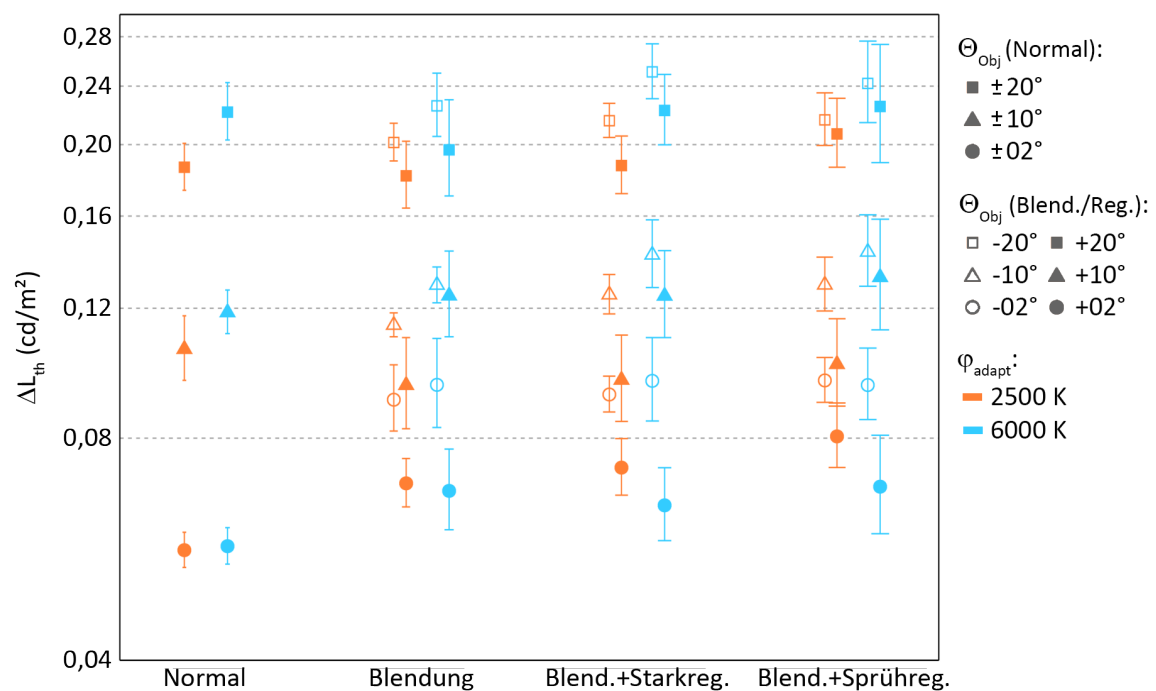


Abbildung 5-10: Leuchtdichteschwellen bei Blendung mit und ohne Regen.

Im direkten Vergleich betragsgleicher Objektpositionen für jede Lichtfarbe ist die Blendwirkung für die linksseitig positionierten Objekte höher. Dieser Unterschied nimmt mit zunehmendem Peripheriewinkel ab.

Der unter Normalbedingungen gemessene Einfluss der Lichtfarbe in Abhängigkeit nahfovealer und peripherer Bedingungen stellt sich auch in den Blendungsuntersuchungen ein. So werden mit einer Farbtemperatur von 6000 K tendenziell geringere Detektionsschwellen im nahfovealen Umfeld erzielt, wohingegen im extrafovealen Bereich eine Umkehr erfolgt; hier fallen die Schwellen unter kaltweißer Beleuchtung höher aus.

Für beide untersuchten Lichtfarben wird die höchste Blendwirkung bei den nahfoveal dargebotenen Objekten erreicht. Hier ist eine deutliche Schwellenerhöhung gegenüber normalen Sehbedingungen zu verzeichnen. Bemerkenswert ist, dass die Detektionsschwellen der peripher gezeigten Objekte trotz Blendung teilweise unter denen bei Normalbedingungen liegen, was einer besseren Erkennbarkeit entspricht. Dies wird insbesondere im Fall von 2500 K bei $\theta_{\text{Obj}} = +10^\circ$ deutlich.

Tabelle 5-7: Leuchtdichteschwellen bei Blendung mit und ohne Regen.

Sehbedingung	L_{adapt} (cd/m ²)	θ_{Obj} (°)	$\Delta L_{\text{th},2500\text{K}}$ (cd/m ²)	$\Delta L_{\text{th},6000\text{K}}$ (cd/m ²)
Normal	1,0	± 02	0,0564	0,0571
		± 10	0,1056	0,1184
		± 20	0,1863	0,2213
Blendung	1,0	-20	0,2013	0,2257
		-10	0,1139	0,1290
		-02	0,0902	0,0945
		+02	0,0695	0,0679
		+10	0,0944	0,1248
		+20	0,1814	0,1967
Blendung + Starkregen	1,0	-20	0,2154	0,2508
		-10	0,1253	0,1418
		-02	0,0917	0,0956
		+02	0,0730	0,0649
		+10	0,0959	0,1247
		+20	0,1873	0,2225
Blendung + Sprühregen	1,0	-20	0,2160	0,2421
		-10	0,1291	0,1431
		-02	0,0958	0,0944
		+02	0,0804	0,0688
		+10	0,1008	0,1322
		+20	0,2068	0,2252

Das kombinierte Auftreten von Blendung und Regen zeigt je nach untersuchter Lichtfarbe verschiedene Tendenzen. Im Fall von 2500 K ist bei der in Abbildung 5-10 von links nach rechts dargestellten Reihenfolge der Störgrößen für nahezu alle Objektpositionen eine leichte Erhöhung der Leuchtdichteschwelle zu verzeichnen. Demnach führt die Kombination aus Blendung und Sprühregen zu den höchsten Leuchtdichteschwellen,

gefolgt von Blendung und Starkregen und Blendung ohne Regen. Einzige Ausnahme bildet die Objektposition $\Theta_{\text{Obj}} = -20^\circ$, bei der die Erkennbarkeit unabhängig von der Regenart stabil zu bleiben scheint. Mit einer Farbtemperatur von 6000 K zeigen sich weniger deutliche Einflüsse der kombinierten Störgrößen. Im Vergleich von Blendung ohne Regen und Blendung mit Starkregen ergibt sich für die peripheren Objekte eine tendenzielle Schwellenerhöhung mit Ausnahme der Position $\Theta_{\text{Obj}} = +10^\circ$, bei der keine Änderung erkennbar ist. Im nahfovealen Bereich bleibt die Leuchtdichteschwelle ebenfalls stabil ($\Theta_{\text{Obj}} = -2^\circ$) bzw. reduziert sich sogar leicht ($\Theta_{\text{Obj}} = +2^\circ$). Beim Vergleich der beiden Regenarten, jeweils in Kombination mit Blendung, ergeben sich für die äußersten Objekte keine Änderungen ($\Theta_{\text{Obj}} = +20^\circ$) bzw. eine leichte Schwellenreduktion ($\Theta_{\text{Obj}} = -20^\circ$). Bei $\Theta_{\text{Obj}} = \pm 10^\circ$ ist wiederum eine leichte Zunahme der Schwelle zu verzeichnen. Im nahfovealen Bereich deutet sich linksseitig ($\Theta_{\text{Obj}} = -2^\circ$) eine leichte Reduktion und rechtsseitig ($\Theta_{\text{Obj}} = +2^\circ$) eine leichte Erhöhung der Schwelle an.

5.3.2 Diskussion

Die in Abbildung 5-11 dargestellten Ergebnisse zeigen die Veränderung der Detektionsschwelle in Abhängigkeit der Störgröße Blendung mit dem Parameter Lichtfarbe. Gegenüber Normalbedingungen (ohne Blendung) führt die im Labor erzeugte Blendwirkung bei jeder Lichtfarbe jeweils zu einer höchst signifikanten Anhebung der Detektionsschwelle ($p_{\text{Irr}} < 0,0001$). Die Hypothese H9 wird daher angenommen.

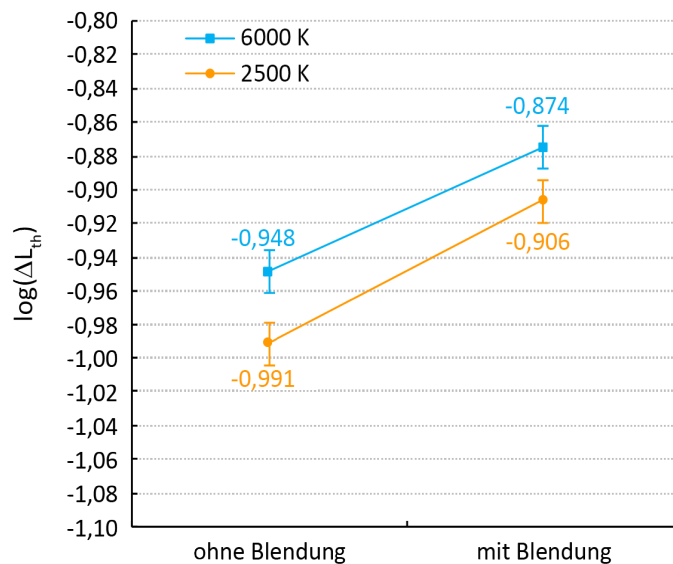


Abbildung 5-11: Einfluss der Wechselwirkung zwischen Lichtfarbe und Blendung auf die Detektionsschwelle.

Aus dem Vergleich beider Lichtfarben geht hervor, dass mit einer adaptionsbestimmenden Farbtemperatur von 2500 K sowohl unter Normalbedingungen (ohne Blendung) als auch mit Blendung geringere Schwellen und damit eine verbesserte Objektdetektion erzielt werden. Dabei ist erkennbar, dass der zwischen beiden Lichtfarben bestehende

Abstand der Detektionsschwellen nicht unabhängig von der Sehbedingung ist, sondern sich unter Blendwirkung reduziert. Während der Schwellenabstand bei Normalbedingungen (ohne Blendung) höchst signifikant ausfällt ($p_{\text{Irr}} < 0,0001$), ergibt sich mit Blendung ein hoch signifikantes Ergebnis ($p_{\text{Irr}} < 0,003$). Demnach ist Hypothese H10 zu verwerfen, die bei einer höheren adaptationsbestimmenden Farbtemperatur eine ebenfalls höhere Blendwirkung postuliert.

Abbildung 5-12 zeigt den Zusammenhang zwischen der Detektionsschwelle und der Objektposition mit dem Parameter Störgröße. An den nahfovealen Positionen ($\Theta_{\text{Obj}} = \pm 2^\circ$) ist die starke Blendwirkung gegenüber den Normalbedingungen (ohne Blendung) jeweils höchst signifikant ($p_{\text{Irr}} < 0,0001$) und nimmt in der Peripherie deutlich ab. Für jede der peripheren Objektpositionen konnten keine signifikanten Schwellenunterschiede zwischen Blendung und Normalbedingung nachgewiesen werden. Die asymmetrische Verteilung der Blendwirkung mit höheren Schwellen links des Fixationspunktes wird durch die Ergebnisse der Signifikanzprüfung bestätigt. Im direkten Vergleich betragsgleicher Objektpositionen ergeben sich für $\Theta_{\text{Obj}} = \pm 2^\circ$ höchst signifikante ($p_{\text{Irr}} < 0,0001$) und für $\Theta_{\text{Obj}} = \pm 10^\circ$ hoch signifikante ($p_{\text{Irr}} = 0,004$) Unterschiede zwischen den Detektionsschwellen. Hingegen wird bei $\Theta_{\text{Obj}} = \pm 20^\circ$ kein signifikanter Unterschied ($p_{\text{Irr}} = 0,108$) mehr erreicht.

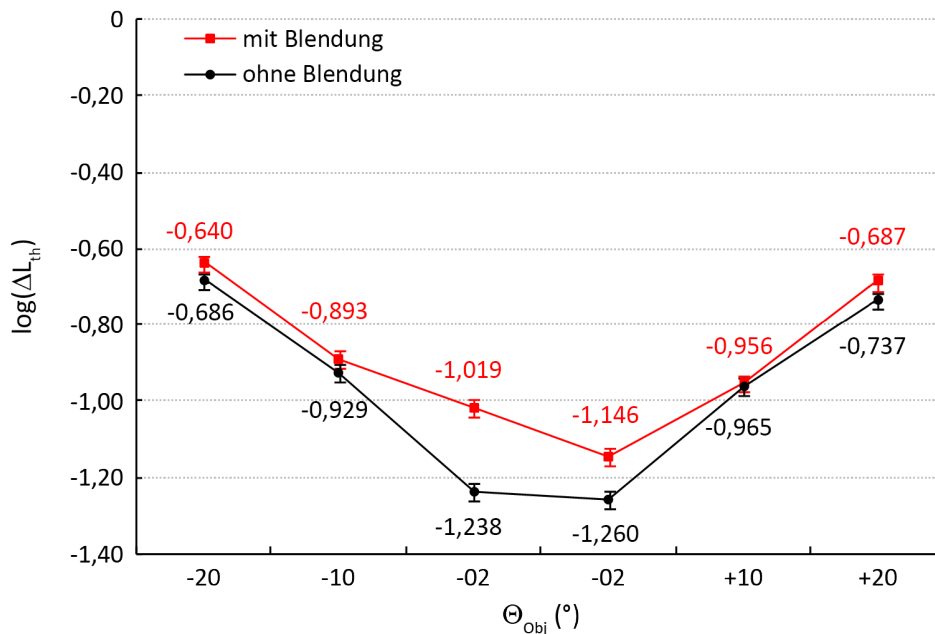


Abbildung 5-12: Einfluss der Objektposition auf die Detektionsschwelle mit dem Parameter Blendung.

Zur Erklärung der beschriebenen Ergebnisse wird die Schleierleuchtdichte herangezogen. Die für die Dimensionierung der Blendwirkung ($TI = 20\%$) nach Gleichung 2-5 berechnete Schleierleuchtdichte von $L_v = 0,3107 \text{ cd/m}^2$ (mit $L_{\text{adapt}} = 1,0 \text{ cd/m}^2$) bezieht sich auf den Blick des Beobachters, der gemäß der Instruktionen zum Versuchsablauf (vgl.

Abschnitt 4.5.3) auf den Fixationspunkt und somit auf eine theoretische Objektposition von $\Theta_{\text{Obj}} = 0^\circ$ (Referenz) gerichtet war. Für die Bewertung der vorliegenden Ergebnisse wurden an jeder der sechs dargebotenen Objektpositionen die durch die fünf Blendquellen erzeugten, effektiv wirksamen Schleierleuchtdichten für jede untersuchte Lichtfarbe berechnet. Die Ergebnisse sind grafisch mit interpoliertem Verlauf in Abbildung 5-13 und numerisch in Tabelle 5-8 dargestellt.

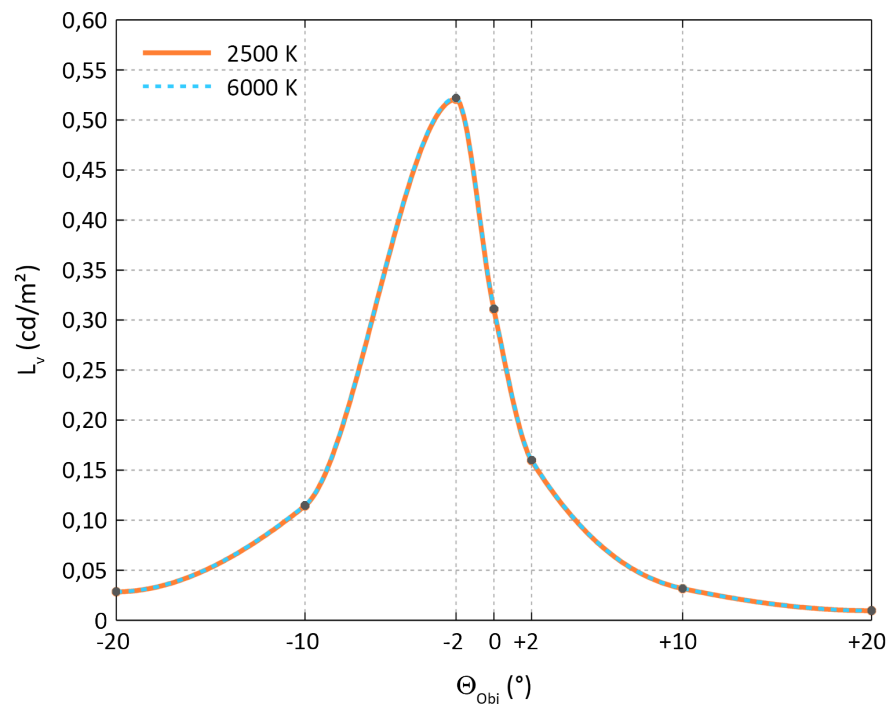


Abbildung 5-13: Effektiv wirksame Schleierleuchtdichte der 5 Blendquellen an den untersuchten Objektpositionen sowie am Fixationspunkt ($\Theta_{\text{Obj}} = 0^\circ$) für 2500 K (orange) und 6000 K (blau).

Die höchste Schleierleuchtdichte tritt an der Objektposition $\Theta_{\text{Obj}} = -2^\circ$ auf. Sie beträgt im Mittel für beide Lichtfarben $L_v = 0,5213 \text{ cd/m}^2$ und übersteigt damit den Referenzwert von $L_v = 0,3107 \text{ cd/m}^2$ an der Position $\Theta_{\text{Obj}} = 0^\circ$ um einen Faktor von knapp 1,7. Die Schleierleuchtdichten der übrigen Positionen liegen unterhalb der Referenz, d. h. die Blendwirkung wird an diesen Positionen bei Verwendung des Referenzwertes überschätzt. Da für die peripheren Objektpositionen keine signifikante Blendwirkung erzielt wurde, ist davon auszugehen, dass die physiologische Blendung für die durchgeführten Versuchsbedingungen erst ab einer Schleierleuchtdichte greift, die oberhalb der an den peripheren Objektpositionen maximal erreichten Schleierleuchtdichte liegt. Dieser maximale Wert ergibt sich an der Position $\Theta_{\text{Obj}} = -10^\circ$ und beträgt im Mittel über beide Lichtfarben $L_v = 0,1145 \text{ cd/m}^2$. Dies entspricht nach Gleichung 2-8 einer Schwellenerhöhung von $TI = 7,4 \%$ für $L_{\text{adapt}} = 1,0 \text{ cd/m}^2$. Inwiefern unterhalb dieses TI -Wertes eine Blendwirkung durch psychologische bedingte Ursachen entsteht, kann im Rahmen der durchgeführten Untersuchung nicht beantwortet werden.

Tabelle 5-8: Schleierleuchtdichten und TI -Werte.

CCT_{adapt}	L_{adapt} (cd/m^2)	Θ_{Obj} ($^\circ$)	L_v (cd/m^2)	TI_B (%)	$TI_{B+\text{Rst}}$ (%)	$TI_{B+\text{Rsp}}$ (%)	TI_{HOLLADAY} (%)	TI_{ADRIAN} (%)
2500 K	1,0	-20	0,0283	3,57	10,87	11,18	1,84	2,04
		-10	0,1142	0,09	10,07	13,46	7,42	8,15
		-02	0,5206	62,22	64,88	72,26	33,84	35,97
		± 0	0,3107	---	---	---	20,20	21,80
		+02	0,1595	21,51	27,58	40,64	10,37	11,34
		+10	0,0315	-4,04	-2,48	2,43	2,05	2,27
		+20	0,0095	1,35	4,66	15,55	0,62	0,68
6000 K	1,0	-20	0,0285	-6,10	4,36	0,71	1,85	2,05
		-10	0,1147	5,54	15,97	17,08	7,46	8,18
		-02	0,5219	62,88	64,86	62,76	33,92	36,05
		± 0	0,3115	---	---	---	20,25	21,86
		+02	0,1600	20,54	15,23	22,15	10,40	11,37
		+10	0,0316	7,74	7,65	14,11	2,06	2,27
		+20	0,0095	-4,10	8,46	9,81	0,62	0,68

Aus den experimentell erzielten Leuchtdichteschwellen (vgl. Tabelle 5-7) wurden für jede Blendungssituation die Schwellenerhöhungen nach Gleichung 2-7 berechnet und in den Spalten TI_B , $TI_{B+\text{Rst}}$ und $TI_{B+\text{Rsp}}$ von Tabelle 5-8 angegeben. Die in den letzten beiden Tabellenspalten dargestellten Schwellenerhöhungen ergeben sich aus den Modellen von HOLLADAY und ADRIAN unter Berücksichtigung der ebenfalls in der Tabelle enthaltenen Schleierleuchtdichten (L_v). Die Schwellenerhöhung nach HOLLADAY ergibt sich aus Gleichung 2-8. Für die Berechnung der Schwellenerhöhung nach ADRIAN wird auf [ADRIAN 1989] verwiesen.

Da sich die Modellergebnisse nach HOLLADAY und ADRIAN nur geringfügig voneinander unterscheiden, werden für die weitere Betrachtung exemplarisch die Werte nach HOLLADAY verwendet. Abbildung 5-14 zeigt die interpolierten Verläufe der experimentellen und modellbasierten TI -Werte in Abhängigkeit der Objektposition für die ähnlichsten Farbtemperaturen von 2500 K (oben) und 6000 K (unten). Die interpolierten Verläufe der Schwellenerhöhungen entsprechen in erster Näherung dem Verlauf der Schleierleuchtdichte nach Abbildung 5-13. Es ist zu beobachten, dass die aus den Versuchsdaten bestimmten Schwellenerhöhungen tendenziell die durch das HOLLADAY-Modell vorausgesagten Werte überschreiten. Die stärksten Überhöhungen treten an der Position $\Theta_{\text{Obj}} = -2^\circ$ auf. Unterschreitungen der Modellwerte führen partiell zu negativen Schwellenerhöhungen, was gleichbedeutend mit einer Schwellenreduktion bzw. einer verbesserten Detektionsleistung ist.

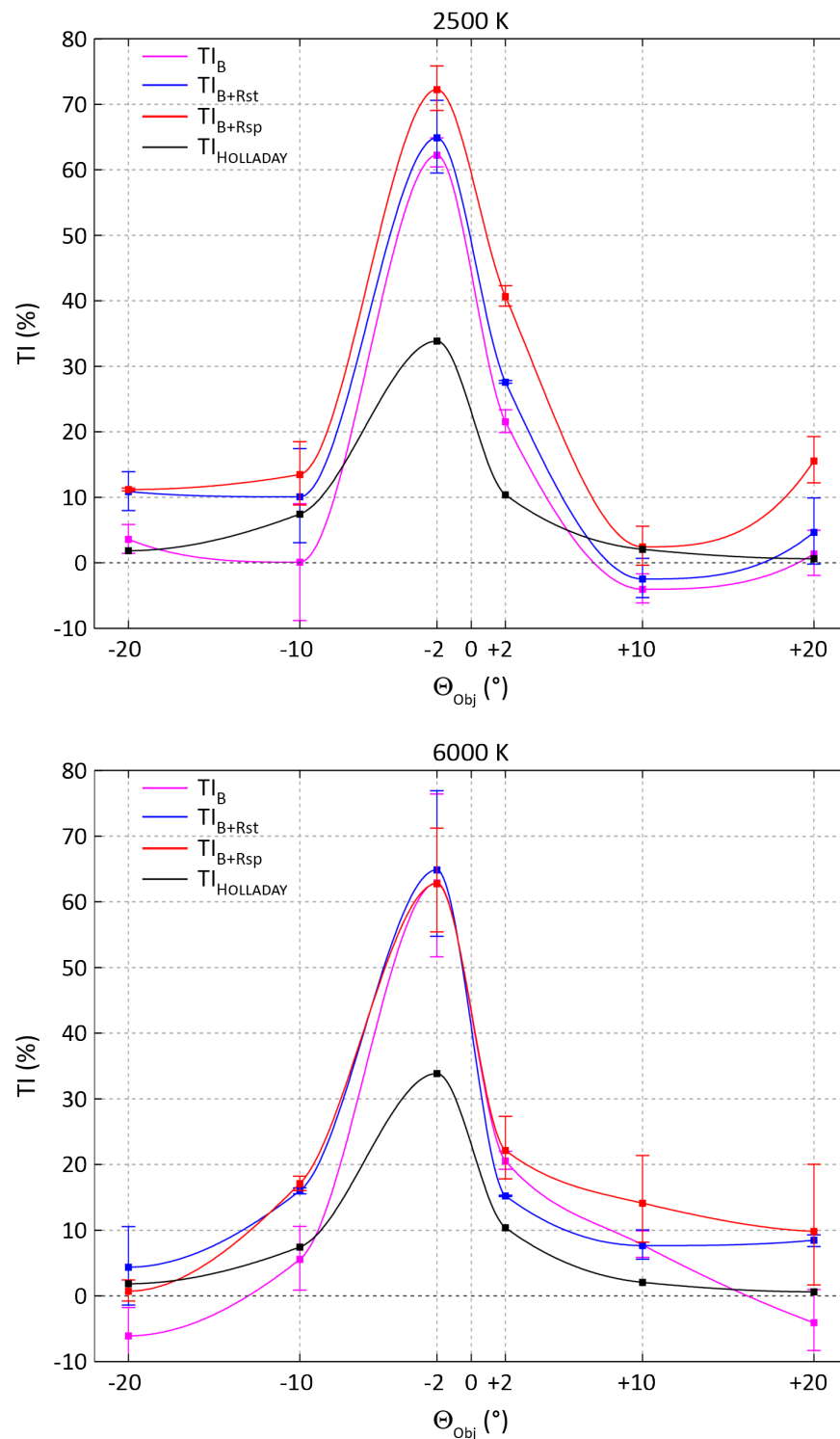


Abbildung 5-14: Schwellenerhöhungen (TI) für Blendung (B), Blendung + Starkregen (B+Rst), Blendung + Sprühregen (B+Rsp) und nach dem Modell von HOLLADAY bei Lichtfarben von jeweils 2500 K (oben) und 6000 K (unten).

Zur Quantifizierung der Unterschiede wird für jede untersuchte Lichtfarbe und Objektposition das Verhältnis zwischen experimentellen und modellbasierten TI -Werten gebildet. Tabelle 5-9 zeigt die resultierenden Verhältnisse. Die über die Objektpositionen durchgeführte Mittelwertbildung (MW) berücksichtigt ausschließlich positive TI -Werte.

Tabelle 5-9: Verhältnisse zwischen experimentellen und modellbasierten TI -Werten.

CCT_{adapt}	L_{adapt} (cd/m^2)	θ_{Obj} ($^\circ$)	$TI_B : TI_{\text{HOLLADAY}}$	$TI_{B+\text{Rst}} : TI_{\text{HOLLADAY}}$	$TI_{B+\text{Rsp}} : TI_{\text{HOLLADAY}}$
2500 K	1,0	-20	1,94	5,91	6,08
		-10	0,01	1,36	1,81
		-02	1,84	1,92	2,14
		+02	2,07	2,66	3,92
		+10	-1,97	-1,21	1,19
		+20	2,18	7,51	25,08
	MW (f. positive TI -Werte)		1,61	3,87	6,70
6000 K	1,0	-20	-3,30	2,36	0,38
		-10	0,74	2,14	2,29
		-02	1,85	1,91	1,85
		+02	1,98	1,46	2,13
		+10	3,76	3,71	6,85
		+20	-6,61	13,65	15,82
	MW (f. positive TI -Werte)		2,08	4,21	4,89

Im Fall der Versuchssituation mit Blendung (B) liegen die experimentell bestimmten Schwellenerhöhungen im Mittel um einen Faktor von 1,61 (2500 K) und 2,08 (6000 K) über den durch das HOLLADAY-Modell geschätzten TI -Werten. Demnach unterschätzen die Modellwerte die im Versuch erhobenen Schwellenerhöhungen.

Weiterhin ist den Werten zu entnehmen, dass die kaltweiße Versuchssituation (6000 K) im Mittel zu einer höheren Schwelle führt. Dieses Ergebnis lässt sich mit der für normale Sehbedingungen durchgeführten Interpretation deuten. Lichtquellen mit einem höheren Anteil kurzwelliger Strahlung im sichtbaren Spektrum werden durch die photopische Bewertung in ihrer Wirkung unterschätzt und führen demnach zu einer erhöhten Blendwirkung, was sich im vorliegenden Fall durch höhere TI -Werte bemerkbar macht.

Als Begründung für die negativen TI -Werte wird angenommen, dass die Versuchspersonen beim Einschalten der Blendquellen ihren Blick reflexartig von der vorgeschriebenen Blickrichtung ($\theta_{\text{Obj}} = 0^\circ$) nach rechts (Seite ohne Blendquellen) abwandten, um der physiologischen Blendwirkung zu entgehen. Entsprechend der zu Abbildung 5-13 geführten Diskussion ist unter den gegebenen Versuchsbedingungen für $TI_{\text{HOLLADAY}} \leq 7,4\%$ keine physiologische Blendung zu erwarten, was gemäß Tabelle 5-8 an den Objektpositionen $\theta_{\text{Obj}} = \pm 20^\circ$ und $\theta_{\text{Obj}} = +10^\circ$ der Fall ist. Die zufällig dort präsentierten Objekte werden bei der abgewandten Blickrichtung unter einem viel kleineren Beobachtungswinkel gesehen und demnach deutlich besser erkannt, wodurch sich kleinere Schwellen bzw. negative Schwellenerhöhungen ergeben.

Hinsichtlich der Wechselwirkung zwischen Blendung und Regenart sind bei 2500 K deutliche Unterschiede an allen Objektpositionen zu beobachten (vgl. Tabelle 5-8). An der Position mit der höchsten Blendwirkung ($\Theta_{\text{Obj}} = -2^\circ$) steigt die Detektionsschwelle für Blendung + Starkregen gegenüber Blendung um 4,3 % und für Blendung + Sprühregen um 16,1 %. Im Gegensatz dazu zeigen sich die Werte bei 6000 K und nahfovealer Betrachtung nahezu unbeeinflusst von der Regenart. Erst mit steigendem Peripheriewinkel deutet sich ein Unterschied an, der jedoch weniger deutlich ausgeprägt ist.

Die generelle Betrachtung der Wechselbeziehungen zwischen Blendung und Regen ist in Abbildung 5-15 gezeigt und führt zu einem signifikanten Ergebnis ($p_{\text{Irr}} = 0,0048$). Auf der Abszisse sind die verwendeten Sehbedingungen ohne und mit Regen aufgetragen. Der Parameter beschreibt die Blendung. Nachfolgend wird auf die Untersuchungen mit Blendung eingegangen, da die Ergebnisse der Versuchssituation ohne Blendung bereits in Abschnitt 5.2 vorgestellt und diskutiert wurden.

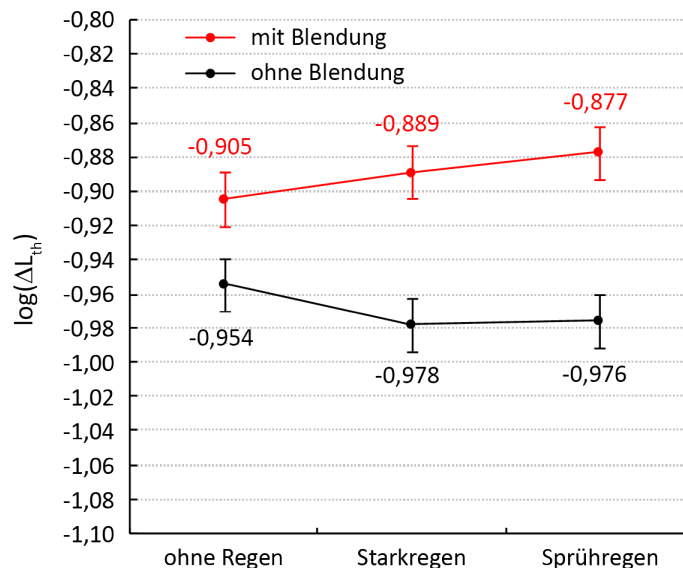


Abbildung 5-15: Einfluss der Wechselwirkung zwischen Blendung und Regenart auf die Detektionsschwelle.

Der Darstellung ist zu entnehmen, dass Versuchsbedingungen mit Blendung zu merklich höheren Detektionsschwellen führen, d. h. die Erkennbarkeit wird unter Blendung erwartungsgemäß verschlechtert. Dieses Ergebnis fällt für jede der drei auf der Abszisse gezeigten Sehbedingungen höchst signifikant ($p_{\text{Irr}} < 0,00014$) aus.

Das kombinierte Auftreten der beiden Störgrößen Blendung und Regen resultiert gegenüber der Blendungssituation ohne Regen in einer weiteren Anhebung der Detektionsschwelle. Diese Schwellenerhöhung lässt sich mit der Aufhellung des Regenereignisses infolge der durch die Blendquellen erzeugten Gegenlichtsituation erklären, wodurch das visuelle Rauschen wahrnehmbar und die Ausübung der Sehaufgabe beeinträchtigt wird. Wie allerdings die Überlappungen der Konfidenzintervalle bereits vermuten lassen, sind die bei Blendung auftretenden Schwellenunterschiede zwischen keinem Regen und

Starkregen ($p_{\text{irr}} = 0,721$), keinem Regen und Sprühregen ($p_{\text{irr}} = 0,142$) sowie Stark- und Sprühregen ($p_{\text{irr}} < 0,907$) jeweils nicht signifikant. Folglich ist Hypothese H11 zu verwerfen. Dennoch lässt sich die in der Hypothese postulierte Kausalbeziehung tendenziell erkennen. Mit kleiner werdendem Tropfendurchmesser des Regenereignisses steigt die Schwelle an. Sprühregen begünstigt durch seine höhere Tropfendichte Mehrfachstreuungen, die im Vergleich zu Starkregen zu einer erhöhten extraokularen Schleierleuchtdichte (vgl. Abschnitt 2.4.1) führen und in einer weitreichenderen Kontrastreduktion resultieren, deren Folge eine Anhebung der Detektionsschwelle ist. Es ist anzunehmen, dass die tendenziellen Auswirkungen mit einer weitaus größeren Ausdehnung der Regenwand deutlich verstärkt werden.

Kapitel 6 Schlussfolgerungen

Diese Arbeit leistet einen Beitrag zum besseren Verständnis der Funktionsweise des visuellen Apparates bezüglich der Objekterkennung unter mesopischen Bedingungen im Anwendungsbereich der Straßenbeleuchtung.

Im ersten Abschnitt dieses letzten Kapitels wird eine Antwort auf die Forschungsfrage gegeben. Hierzu werden Versuchsmethodik, Ergebnisse und Relevanz der Erkenntnisse für die praktische Anwendung zusammengefasst. Die Beantwortung der Forschungsfrage erhebt allerdings keinen Anspruch auf Vollständigkeit, weil die verwendete Versuchsmethodik lediglich einen möglichen Ansatz zur Untersuchung der Thematik vertritt. Infolgedessen werden im zweiten Abschnitt dieses Kapitels Schlussfolgerungen für die Wissenschaft gegeben, die das in dieser Arbeit angewandte Vorgehen kritisch reflektieren und daraus Anregungen für weiterführende Forschungsthemen entwickeln.

6.1 Für die Praxis

In einer experimentell angelegten Laborstudie wurde die Erkennung nahfoveal ($\pm 2^\circ$) und peripher ($\pm 10^\circ$, $\pm 20^\circ$) dargebotener Sehobjekte bei vier verschiedenen, weißlichtähnlichen Lichtfarben (2500 K; 4000 K; 6000 K; Mint) und jeweils drei Adaptationsniveaus (0,3; 1,0; 3,0 cd/m²) untersucht. Mittels der Konstanzmethode wurden die 19' großen, quadratischen Sehobjekte im Positivkontrast vor einem homogen empfundenen und hinreichend großen ($44^\circ \times 24^\circ$) Adaptationsfeld mit einer Darbietungsdauer von jeweils 200 ms in zufälliger Reihenfolge gezeigt. Das aus 32 Versuchspersonen bestehende, balancierte Kollektiv mit einem durchschnittlichen (Median) Alter von 25,5 Jahren bewertete die Erkennbarkeit der Objekte anhand von drei Antwortmöglichkeiten („links gesehen“, „rechts gesehen“, „nicht gesehen“). Ergänzend zu diesen normalen Sehbedingungen umfasste die Untersuchung auch, durch die Störgrößen Regen („Starkregen“, „Sprühregen“) und Blendung sowie deren Kombination hervorgerufene, erschwerte Sehbedingungen.

Die Auslegung der Apparatur und die Auswahl der Versuchsparameter orientierten sich an den in der Straßenbeleuchtung auftretenden, typischen Bedingungen mit dem Ziel der vereinfachten Anwendbarkeit der Ergebnisse im realen Umfeld. Damit wurde ein Untersuchungsansatz geschaffen, der eine direkte Vergleichbarkeit von Leuchtdichteschwellen bei verschiedenen Sehbedingungen ermöglicht, die unter kontrollierten

Bedingungen erhoben wurden. Eine vergleichbare Untersuchung zur Bestimmung von Detektionsschwellen mit dem hier durchgeführten Parameterumfang konnte in der wissenschaftlichen Literatur nicht gefunden werden.

Mit den Ergebnissen konnten drei der eingangs postulierten Hypothesen bestätigt werden. Die Detektionsschwelle erhöht sich jeweils bei Zunahme der Adaptationsleuchtdichte (H1), bei Vergrößerung des Objektwinkels (H2) sowie unter Blendwirkung (H3). Weitaus interessanter ist die Erkenntnis, dass die Detektionsschwelle durch die adaptionsbestimmende Lichtfarbe verändert wird. Bei nahfoveal dargebotenen Sehobjekten konnte bei 6000 K gegenüber den anderen untersuchten Farben eine signifikant geringere Leuchtdichteschwelle beobachtet werden, d. h. Lichtfarben mit einem höheren s/p -Verhältnis führen unter diesen Bedingungen zu einer gesteigerten Erkennbarkeit. Für peripher dargebotene Objekte kehrt sich dieser Einfluss um. Hier führen kaltweißere Lichtfarben tendenziell zu höheren Detektionsschwellen. Die Erklärung dieses Ergebnisses lässt sich auf den an der Detektion jeweils dominierend beteiligten Rezeptortyp zurückführen, der im vorliegenden Fall weniger von dem Helligkeitsniveau sondern vielmehr durch die Objektposition bestimmt wird. Folglich ist der Einfluss der Lichtfarbe nicht nur eindimensional auf das Adaptationsniveau zu beziehen, sondern in Kombination mit der Objektposition zu werten.

Unter Regeneinwirkung kann kein statistisch signifikanter Einfluss auf die Objektdetektion nachgewiesen werden. Die ausbleibende Wirkung ist auf die geringe Tiefe der Regenwand und die ausschließlich diffusen Lichtverhältnisse der Versuche zurückzuführen, wodurch das visuelle Rauschen des Regenereignisses kaum wahrnehmbar war und damit seine erwartete Wirkung verfehlte. Im Ansatz zeigen die Ergebnisse jedoch, dass Sprühregen generell betrachtet zu einer stärkeren Beeinträchtigung der Erkennbarkeit führt. Hinsichtlich der Lichtfarbe ergeben sich bei 6000 K deutlichere Änderungen als bei 2500 K. Insbesondere im Vergleich der beiden Regenarten deutet sich für 6000 K an, dass die Leuchtdichteschwelle bei Sprühregen stärker zunimmt. Dieser Einfluss wird durch die höhere extraokulare Schleierwirkung des Sprühregens gegenüber Starkregen begründet.

Die Blendwirkung fällt in Abhängigkeit der untersuchten Sehobjektpositionen unterschiedlich stark aus. Die gemessenen Leuchtdichteschwellen übersteigen die nach den Modellen von HOLLADAY und ADRIAN geschätzten Blendwirkungen um einen Faktor von 1,6 (2500 K) bzw. 2,0 (6000 K).

Die Kombination von Regen und Blendung erhöht die beeinträchtigende Wirkung auf die Detektionsleistung und fällt für Sprühregen am stärksten aus. Diese Beobachtung ist statistisch nicht gefestigt. Es ist jedoch anzunehmen, dass die Einflüsse bei einer längeren Regenstrecke, d. h. einer größeren Tiefe der Regenwand, signifikant ausfallen. Inwiefern die Addition der jeweils durch die einzelnen Störgrößen Regen und Blendung bewirkten Schwellenänderungen zu demselben Ergebnis führt wie deren kombinierte Anwendung, kann aufgrund der vorliegenden Datenbasis nicht beurteilt werden.

Hinsichtlich der praktischen Anwendbarkeit der Ergebnisse lässt sich für die Wahl einer begünstigten Lichtfarbe keine pauschale Empfehlung aussprechen. So bietet sich die kaltweiße Lichtfarbe, mit der eine verbesserte Erkennbarkeit nahfovealer Objekte erreicht wird, bei Beleuchtungsaufgaben an, die wenig periphere Aufmerksamkeit erfordern. Soll mit der Beleuchtung auch verstärkt die periphere Detektion unterstützt werden, kann eine warmweiße Lichtfarbe vorteilhaft sein. Aus energetischen Gesichtspunkten wird jedoch eine kaltweiße Lichtfarbe (6000 K) mit Absenkung des mittleren Helligkeitsniveaus empfohlen. Hierdurch würde die Detektionsschwelle im peripheren Bereich leicht sinken und im nahfovealen Bereich leicht ansteigen. Gegenüber der ähnlichsten Farbtemperatur von 2500 K könnte die Detektionsleistung bei geringerem Energieeintrag des Beleuchtungssystems vergleichbar gehalten werden.

In Großbritannien wird die Absenkung des mittleren Helligkeitsniveaus bereits normativ empfohlen, wobei der Farbwiedergabeindex (R_a) der bei der Beleuchtungsanlage verwendeten Lichtfarbe als Entscheidungskriterium zugrunde gelegt wird [BS 5489-1]. Demnach kann bei einem Mindestwert von $R_a = 60$ ein um eine Beleuchtungsklasse geringeres Leuchtdichteniveau angesetzt werden. Für die in dieser Arbeit verwendeten ähnlichsten Farbtemperaturen von 2500 K, 4000 K und 6000 K ergab sich bei allen untersuchten Leuchtdichteniveaus (0,3; 1,0; 3,0 cd/m²) ein Farbwiedergabeindex von jeweils $R_a > 60$. Für die Lichtfarbe Mint betrug der Wert bei allen untersuchten Helligkeitsniveaus hingegen $R_a < 60$. Folglich könnten bei Anwendung der britischen Norm für die drei ähnlichsten Farbtemperaturen jeweils geringere Leuchtdichteniveaus angesetzt werden, wohingegen dies für Mint ausgeschlossen ist. Demgegenüber stehen die Resultate dieser Arbeit, die für den generellen Einfluss der untersuchten Lichtfarben auf die Detektionsschwelle keine signifikanten Unterschiede nachweisen konnten (vgl. Abbildung 5-4). Dieses Ergebnis zeigt, dass der mit dem Farbwiedergabeindex praktizierte Ansatz nicht hinreichend zielführend ist.

Alternativ wird vorgeschlagen, die räumliche Ausdehnung der erforderlichen Sehaufgabe in Verbindung mit dem s/p -Verhältnis der verwendeten Lichtquelle als Grundlage zu nutzen, um über eine Absenkung des mittleren Helligkeitsniveaus zu entscheiden. In diesem Zusammenhang wird die Überarbeitung der europäischen Normung gefordert, bei der die Möglichkeit der Helligkeitsabsenkung unter den hier diskutierten Voraussetzungen vorgesehen wird.

Die bei erschwerten Sehbedingungen erwarteten Schwellenerhöhungen konnten bei den in dieser Arbeit durchgeführten Versuchen nur für die generelle Betrachtung der Blendung bestätigt werden. Ein Einfluss der Farbtemperatur auf die Detektionsleistung bei Blendung konnte nicht nachgewiesen werden.

Bei Regen zeigt sich mit zunehmender Dichte des optischen Mediums, dass der sich tendenziell andeutende Einfluss der Lichtfarbe reduziert. Hieraus lässt sich eine neue Hypothese ableiten, dass die Wirkung der adaptationsbestimmenden Lichtfarbe auf die Erkennbarkeit von Sehobjekten negativ mit dem extraokularen Schleier korreliert.

Interessant ist das Ergebnis der kombinierten Wirkung aus Regen und Blendung, bei dem tendenzielle Unterschiede zwischen den ähnlichsten Farbtemperaturen 2500 K und 6000 K zu beobachten sind. Bei warmweißem Umfeld erhöht sich die Schwelle an nahezu allen Objektpositionen bei Blendung mit zusätzlichem Regenereignis gegenüber Blendung ohne Regen. Dabei fällt die Schwellenerhöhung bei Blendung und Sprühregen etwas höher aus als für die Kombination aus Blendung und Starkregen. Demgegenüber führt Blendung mit Regenereignis bei kaltweißer Beleuchtung (6000 K) lediglich zu einer Schwellenerhöhung in der Peripherie, wobei die tendenziellen Unterschiede zwischen Blendung mit Stark- und Blendung mit Sprühregen weniger deutlich sind. Im nahfovealen Bereich ergeben sich gegenüber 2500 K allerdings leichte Vorteile, d. h. die Schwellen fallen etwas geringer aus. Aufgrund der sich andeutenden, verbesserten nahfovealen Objektdetektion sowie der höheren Robustheit der peripheren Detektionsschwellen bei kombinierten Störgrößen (Blendung und Regenart) wird die kaltweiße Lichtfarbe unter widrigen Wetterbedingungen vorzugsweise empfohlen.

Abschließend kann festgehalten werden, dass die Bedeutung Lichtfarbe bei leistungsbaasierten Sehaufgaben unter mesopischen Bedingungen nicht zu unterschätzen ist. Zusätzlich trägt sie zur energetischen Effizienz der Beleuchtungsanlage sowie deren ästhetischer Wirkung auf das beleuchtete Umfeld bei. Es wird daher angeraten, die Wahl der Lichtfarbe zukünftig bei der Planung, Auslegung und Bewertung von Straßenbeleuchtungsanlagen (stärker) zu berücksichtigen.

6.2 Für die Wissenschaft

Die Arbeit in dem Versuchsaufbau hat sich als stabil und valide erwiesen. Es ist daher eine Fortführung von Detektionsuntersuchungen mit der Apparatur wünschenswert, um weitere Lichtfarben und Adaptationsniveaus im Anwendungsbereich der Straßenbeleuchtung zu erproben und damit den in dieser Dissertation erreichten Kenntnisstand auszubauen.

Für eine noch bessere Darstellung praxisähnlicher Bedingungen ist die Untersuchung inhomogener Umfelder denkbar, deren Palette von abstrakten Strukturen bis hin zu fotorealistischen Abbildungen von Straßenzügen reichen kann. Zur Verbesserung der Regenuntersuchung wird eine direkte Beleuchtung des Regenereignisses mit variabler Farb- und Helligkeitseinstellung vorgeschlagen. Die Modularität des Aufbaus ermöglicht das einfache Anschlagen farbveränderlicher Leuchten zwischen den Düsen der Beregnungsanlage sowie deren Einbindung in das Steuerungssystem. Zur Erweiterung des Kenntnisstands bei Blendung wird eine Weiterführung der Forschungsaktivitäten mit variierenden Schleierleuchtdichten, d. h. verschiedenen *TI*-Werten, vorgeschlagen, die wahlweise auch bei anderweitigen Lichtfarben erprobt werden. Bezüglich der Ergebnisse von [JAINSKI 1962] sind die Einflüsse der Lichtfarbe auf die Readaptationszeiten nach Blendung oder transiente Adaptationsvorgänge ebenfalls als interessante Folgestudien

zu nennen. Optional können auch Untersuchungen mit verschiedenen Blendquellenanordnungen durchgeführt werden, die beispielsweise eine rechts- oder beidseitige Lichtpunktanordnung ortsfester Straßenbeleuchtung abstrahieren.

Mit den vorgeschlagenen Erweiterungen im Bereich der Regen- und Blendungsuntersuchung ist es denkbar, ein Wahrnehmungsmodell für die Straßenbeleuchtung bei erschwerten Sehbedingungen zu entwickeln. Hierbei ist insbesondere die Frage nach der Additivität der Störgrößeneinflüsse zu stellen. Wenn die durch Regen bedingten Einflüsse über eine äquivalente extraokulare Schleierleuchtdichte beschreibbar wären, ist von einer additiven Wirkung bei der Kombination von Regen und Blendung auszugehen. Womöglich lässt sich auch ein Strukturierungsfaktor bestimmen, der das visuell wahrnehmbare Rauschen des Regenereignisses in Abhängigkeit der Regenart beschreibt.

Die bei der Versuchsdurchführung gesammelten Erfahrungen haben gelehrt, dass eine kurze Befragung der Versuchspersonen nach Abschluss einer Versuchsreihe bzw. Versuchssitzung als sinnvoll erachtet wird. Angaben zum Schwierigkeitsgrad der Sehaufgabe sowie dem Wohlbefinden und der Ermüdung können weitere Rückschlüsse auf die Wirkung der Lichtfarbe im Außenraum ermöglichen und mitunter zur Klärung offener Fragen bei der Interpretation der physiologischen Ergebnisse herangezogen werden. Daher wird bei zukünftigen Arbeiten zu physiologischen Schwellenmessungen die Erhebung psychologischer Daten in Form eines Fragebogens nachdrücklich empfohlen.

Ungeachtet der guten Erfahrungen, die im Umgang mit der Apparatur gesammelt wurden, bleibt zu erwähnen, dass bei der verwendeten Darstellungsmethode lediglich ein Leuchtmittel mit breitem Spektralbereich (Höchstdrucklampe des Projektors) zur Erzeugung der verschiedenen Lichtfarben verwendet wurde. Interessant wäre in diesem Zusammenhang auch die Bestimmung von Detektionsschwellen bei den nativen Spektren typischer Leuchtmittel in der Straßenbeleuchtung (Natriumdampf-, Metaldampf- und Quecksilberdampflampe) sowie verschiedener LED-Lichtquellen. Daher wird eine ergänzende Laborstudie mit anderem Aufbau vorgeschlagen, welche gezielt den Einfluss verschiedener Spektren auf die Detektionsleistung untersucht.

Weiteres Forschungspotential besteht in der Untersuchung gerontologischer Einflüsse. Es ist anzunehmen, dass die diskutierten Vorteile der kaltweißen Beleuchtung bei Versuchspersonen höheren Alters nicht mehr greifen oder sich sogar beeinträchtigend auswirken, da die zunehmende Verfärbung der Augenlinse vermehrt zu einer reduzierten Transmission kurzwelliger Strahlung führt. Zur Prüfung dieser Annahmen werden vergleichbare Untersuchungen mit unterschiedlichen Altersgruppen vorgeschlagen.

Bei der Ergebnisverwertung, d. h. deren Anwendung bei der Planung und Bewertung ortsfester Straßenbeleuchtungsanlagen, ist zu berücksichtigen, dass die Leuchtdichteschwellen unter Laborbedingungen erhoben wurden. Trotz der Wahl praxisgerechter

Versuchsbedingungen und der hohen Anzahl erhobener Messdaten ist die Verallgemeinerung der Erkenntnisse durch Feldstudien zu validieren. Sollten die Vorteile von Lichtfarben mit höheren s/p -Verhältnissen in weiteren Studien (Labor sowie Feld) bestätigt werden, ist über die Detektionsleistung hinausgehend zu erproben, inwiefern die hierdurch verstärkt wirkende chromatische Aberration des Auges zur einer Reduktion der Sehschärfe führt (vgl. [BULLOUGH 2001]).

In der Straßenbeleuchtungspraxis wurde der Lichtfarbe bisher wenig Bedeutung beigemessen; der vorliegende Kenntnisstand zu deren Auswirkung auf die visuelle Wahrnehmung bei Durchführung einer den nächtlichen Verkehrsverhältnissen angepassten Sehaufgabe ist demzufolge ausbaufähig. Unter Berücksichtigung der gegenwärtigen Entwicklungen in der Straßenbeleuchtung (vgl. Abschnitt 1.1) ist davon auszugehen, dass die hier aufgeführten Anregungen zur wissenschaftlichen Fortführung des Themas auf hohes Interesse stoßen werden. In diesem Zusammenhang seien informationsverarbeitende Beleuchtungssysteme erwähnt, die Lichtstrom, Lichtfarbe und Lichtverteilung im laufenden Betrieb innerhalb eines zulässigen Parameterbereichs an die vorherrschenden Umgebungssituationen anpassen, um beispielsweise die Sehbedingungen bei wechselnden Beleuchtungs- und Witterungsbedingungen konstant zu halten. Dieser bislang noch weitgehend unbekannte Parameterbereich umfasst u. a. Angaben zur Größe des mit der Beleuchtungsanlage darstellbaren Farbraums (Gamut) und zu Überblendzeiten beim Wechsel zwischen Lichtfarben und/oder Adaptationsniveaus. Zur Erschließung dieses unbekannten Bereichs sind umfassende Erkenntnisse über die Funktionsmechanismen des visuellen Apparates in Abhängigkeit der Lichtfarbe zwingend erforderlich, damit dynamische Lichtänderungen weder zu einer psychischen noch physischen Beeinträchtigung des Verkehrsteilnehmers bei der Ausübung seiner Sehaufgabe führen.

Anhang

A.1 Psychometrische Kurven und Leuchtdichteunterschiede der Testreize

Dieser Teil des Anhangs enthält die psychometrischen Funktionen (Kurven), die für jede der 22 Versuchsreihen aus den über das Kollektiv gemittelten Punktschätzern (Kollektivschwelen) bestimmt wurden. Die Modellierung wird ausführlich in Abschnitt 4.6.2 beschrieben. Entsprechend den darin gegebenen Ausführungen wurden bei den Versuchen ohne Blendung betragsgleiche Objektpositionen zusammengefasst.

Ergänzend zu den Diagrammen sind die in jeder Versuchsreihe verwendeten Leuchtdichteunterschiede zwischen den dargebotenen Testzeichen und ihrer unmittelbaren Umgebung (Reizstufen) tabellarisch aufgeführt. Die darin verwendeten Indizes in Form einer fortlaufenden Nummerierung dienen zur Unterscheidung der Reizstufen. Je höher der Index, desto größer ist auch die Reizstufe.

Das zur Benennung der Versuchsreihen verwendete Bezeichnungsschema setzt sich aus den Variablen ‚Lichtfarbe‘, ‚Adaptationsniveau‘ und ‚Störgröße‘, die jeweils durch einen Bindestrich getrennt sind, zusammen. So entspricht die Bezeichnung 2500-0,3-N der Versuchsreihe mit einer Lichtfarbe von $\varphi_{\text{adapt}} = 2500$ K und einem Adaptationsniveau von $L_{\text{adapt}} = 1,0$ cd/m² bei normalen (ungestörten) Bedingungen. Die Ausprägungen der Variablen sind Tabelle 4-1 zu entnehmen.

Versuchsreihe: 2500-0,3-N

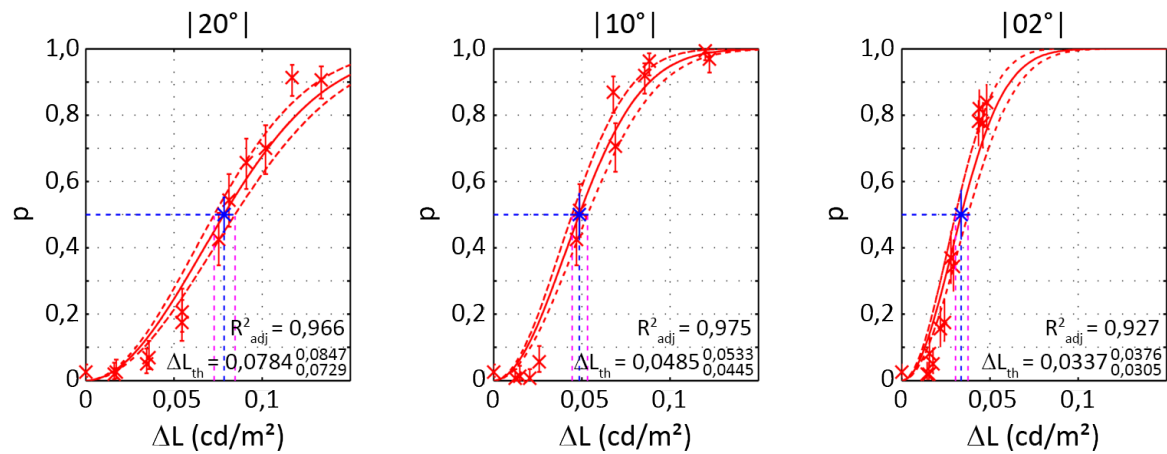


Abbildung A.1-1: Psychometrische Kurven für 2500-0,3-N.

Tabelle A.1-1: Leuchtdichteunterschiede der Testreize für 2500-0,3-N.

θ_{Obj} ($^\circ$)	ΔL_1 (cd/m ²)	ΔL_2 (cd/m ²)	ΔL_3 (cd/m ²)	ΔL_4 (cd/m ²)	ΔL_5 (cd/m ²)	ΔL_6 (cd/m ²)
-20	0,0173	0,0359	0,0546	0,0813	0,1020	0,1336
-10	0,0148	0,0205	0,0470	0,0690	0,0856	0,1223
-02	0,0154	0,0157	0,0219	0,0279	0,0435	0,0439
+02	0,0144	0,0178	0,0242	0,0293	0,0460	0,0481
+10	0,0122	0,0259	0,0487	0,0679	0,0882	0,1200
+20	0,0162	0,0345	0,0547	0,0754	0,0911	0,1171

Versuchsreihe: 2500-1,0-N

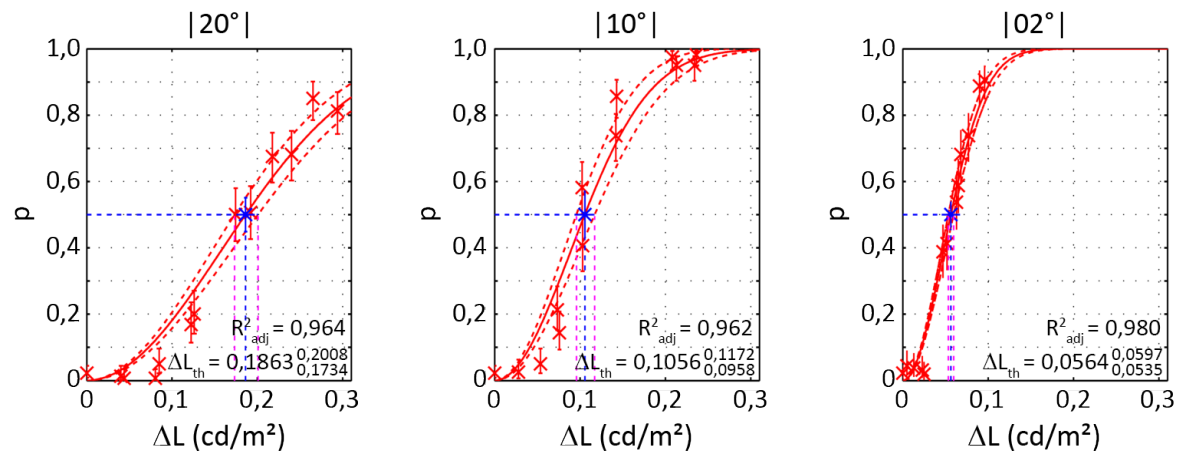


Abbildung A.1-2: Psychometrische Kurven für 2500-1,0-N.

Tabelle A.1-2: Leuchtdichteunterschiede der Testreize für 2500-1,0-N.

θ_{Obj} (°)	ΔL_1 (cd/m^2)	ΔL_2 (cd/m^2)	ΔL_3 (cd/m^2)	ΔL_4 (cd/m^2)	ΔL_5 (cd/m^2)	ΔL_6 (cd/m^2)
-20	0,0440	0,0850	0,1260	0,1920	0,2400	0,2940
-10	0,0280	0,0760	0,1030	0,1420	0,2130	0,2340
-02	0,0050	0,0230	0,0470	0,0630	0,0680	0,0900
+02	0,0130	0,0250	0,0520	0,0650	0,0770	0,0960
+10	0,0537	0,0734	0,1025	0,1429	0,2082	0,2363
+20	0,0401	0,0804	0,1224	0,1746	0,2175	0,2651

Versuchsreihe: 2500-3,0-N

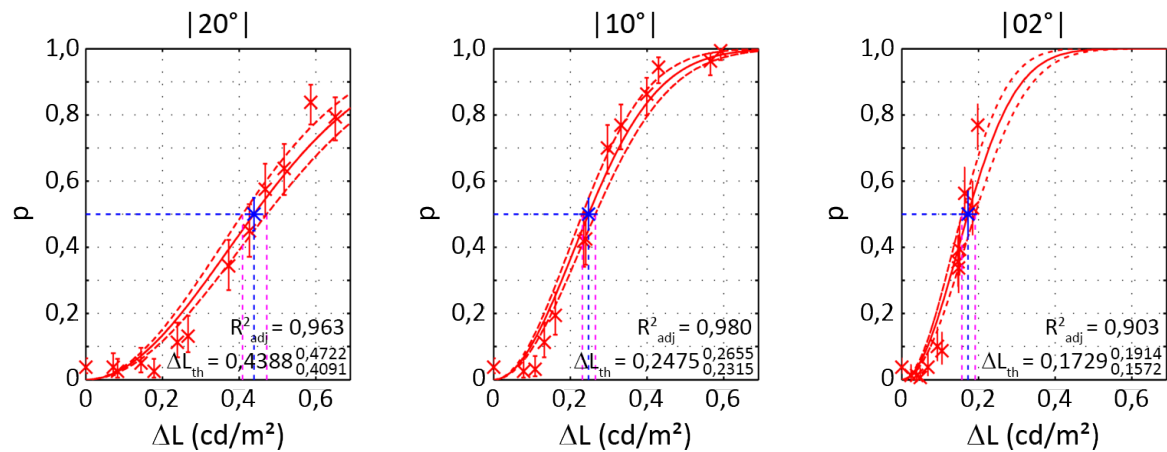


Abbildung A.1-3: Psychometrische Kurven für 2500-3,0-N.

Tabelle A.1-3: Leuchtdichteunterschiede der Testreize für 2500-3,0-N.

θ_{Obj} (°)	ΔL_1 (cd/m ²)	ΔL_2 (cd/m ²)	ΔL_3 (cd/m ²)	ΔL_4 (cd/m ²)	ΔL_5 (cd/m ²)	ΔL_6 (cd/m ²)
-20	0,0720	0,1440	0,2390	0,4270	0,5180	0,6510
-10	0,0780	0,1320	0,2400	0,2970	0,3990	0,5650
-02	0,0240	0,0480	0,0930	0,1470	0,1510	0,1640
+02	0,0390	0,0680	0,1050	0,1480	0,1850	0,1980
+10	0,1080	0,1610	0,2350	0,3320	0,4300	0,5920
+20	0,0830	0,1780	0,2670	0,3730	0,4680	0,5870

Versuchsreihe: 2500-1,0-Rst

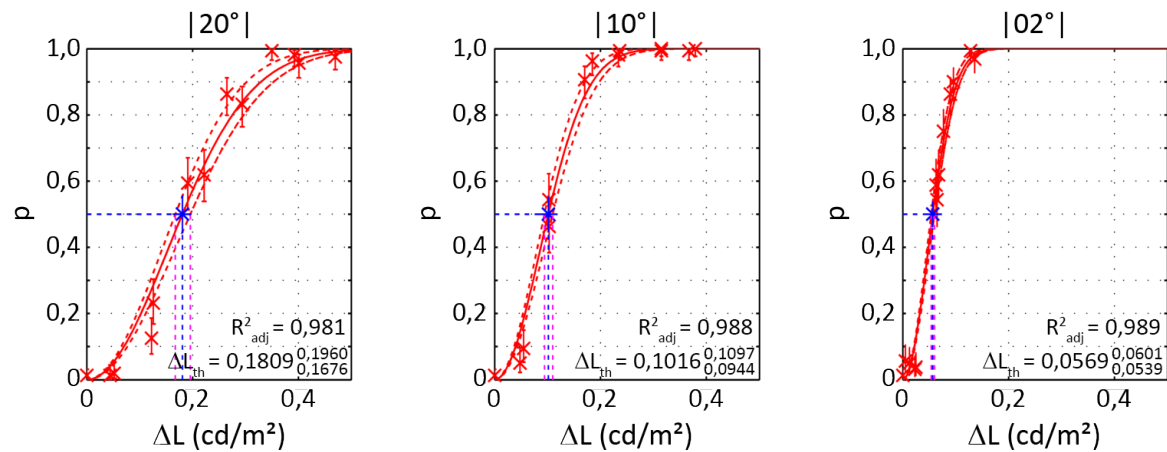


Abbildung A.1-4: Psychometrische Kurven für 2500-1,0-Rst.

Tabelle A.1-4: Leuchtdichteunterschiede der Testreize für 2500-1,0-Rst.

θ_{Obj} (°)	ΔL_1 (cd/m ²)	ΔL_2 (cd/m ²)	ΔL_3 (cd/m ²)	ΔL_4 (cd/m ²)	ΔL_5 (cd/m ²)	ΔL_6 (cd/m ²)
-20	0,0520	0,1260	0,2220	0,2940	0,4010	0,4700
-10	0,0480	0,1030	0,1700	0,2340	0,3150	0,3790
-02	0,0050	0,0230	0,0630	0,0680	0,0900	0,1280
+02	0,0130	0,0250	0,0650	0,0770	0,0960	0,1360
+10	0,0549	0,1025	0,1845	0,2363	0,3151	0,3670
+20	0,0443	0,1224	0,1909	0,2651	0,3498	0,3927

Versuchsreihe: 2500-1,0-Rsp

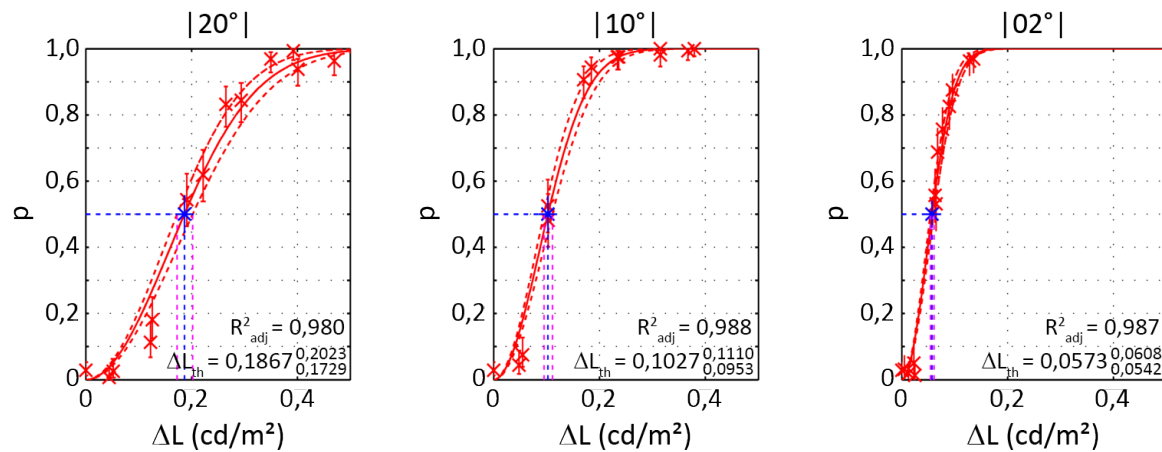


Abbildung A.1-5: Psychometrische Kurven für 2500-1,0-Rsp.

Tabelle A.1-5: Leuchtdichteunterschiede der Testreize für 2500-1,0-Rsp.

θ_{Obj} (°)	ΔL_1 (cd/m ²)	ΔL_2 (cd/m ²)	ΔL_3 (cd/m ²)	ΔL_4 (cd/m ²)	ΔL_5 (cd/m ²)	ΔL_6 (cd/m ²)
-20	0,0520	0,1260	0,2220	0,2940	0,4010	0,4700
-10	0,0480	0,1030	0,1700	0,2340	0,3150	0,3790
-02	0,0050	0,0230	0,0630	0,0680	0,0900	0,1280
+02	0,0130	0,0250	0,0650	0,0770	0,0960	0,1360
+10	0,0549	0,1025	0,1845	0,2363	0,3151	0,3670
+20	0,0443	0,1224	0,1909	0,2651	0,3498	0,3927

Versuchsreihe: 2500-1,0-B

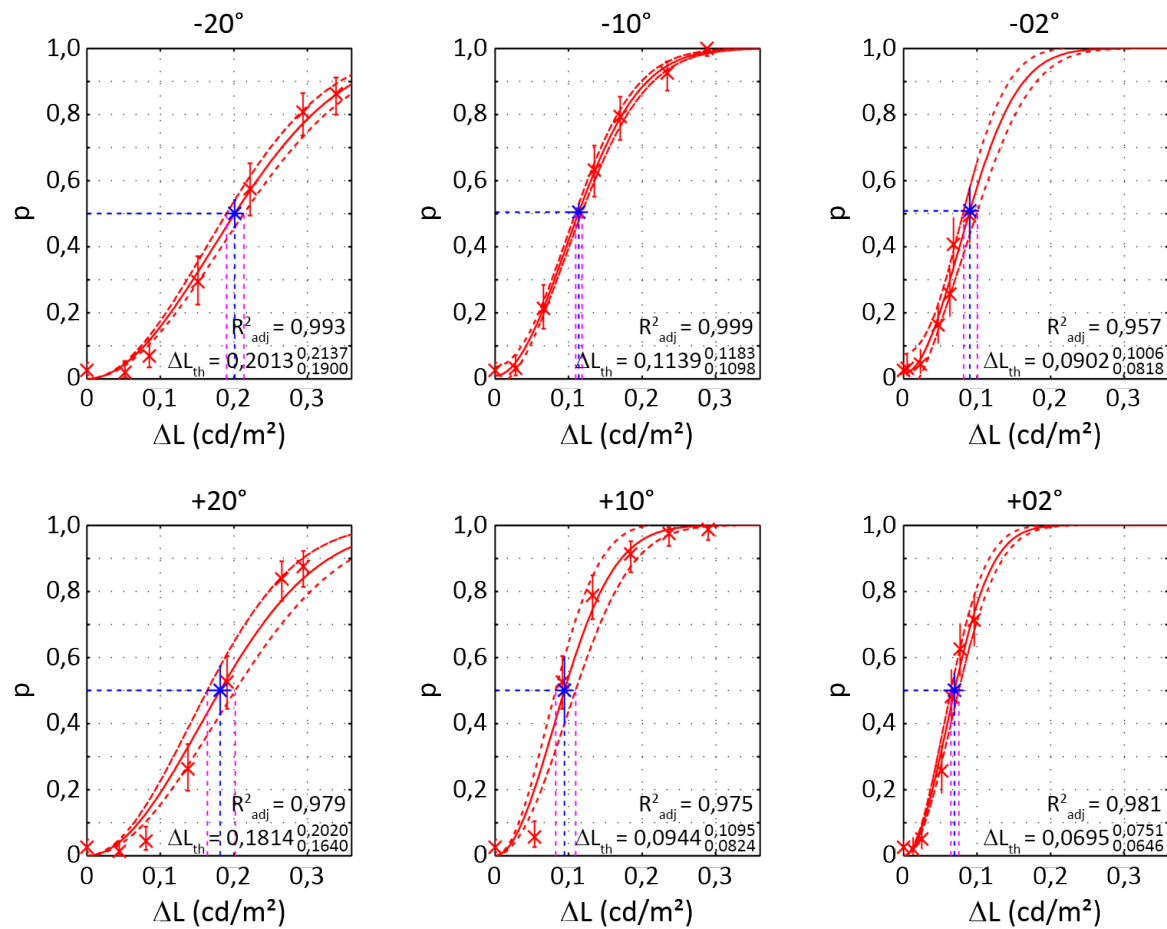


Abbildung A.1-6: Psychometrische Kurven für 2500-1,0-B.

Tabelle A.1-6: Leuchtdichteunterschiede der Testreize für 2500-1,0-B.

θ_{Obj} (°)	ΔL_1 (cd/m²)	ΔL_2 (cd/m²)	ΔL_3 (cd/m²)	ΔL_4 (cd/m²)	ΔL_5 (cd/m²)	ΔL_6 (cd/m²)
-20	0,0520	0,0850	0,1510	0,2220	0,2940	0,3390
-10	0,0280	0,0660	0,1350	0,1700	0,2340	0,2880
-02	0,0050	0,0230	0,0470	0,0630	0,0680	0,0900
+02	0,0130	0,0250	0,0520	0,0650	0,0770	0,0960
+10	0,0537	0,0917	0,1327	0,1845	0,2363	0,2896
+20	0,0443	0,0804	0,1374	0,1909	0,2651	0,2945

Versuchsreihe: 2500-1,0-B+Rst

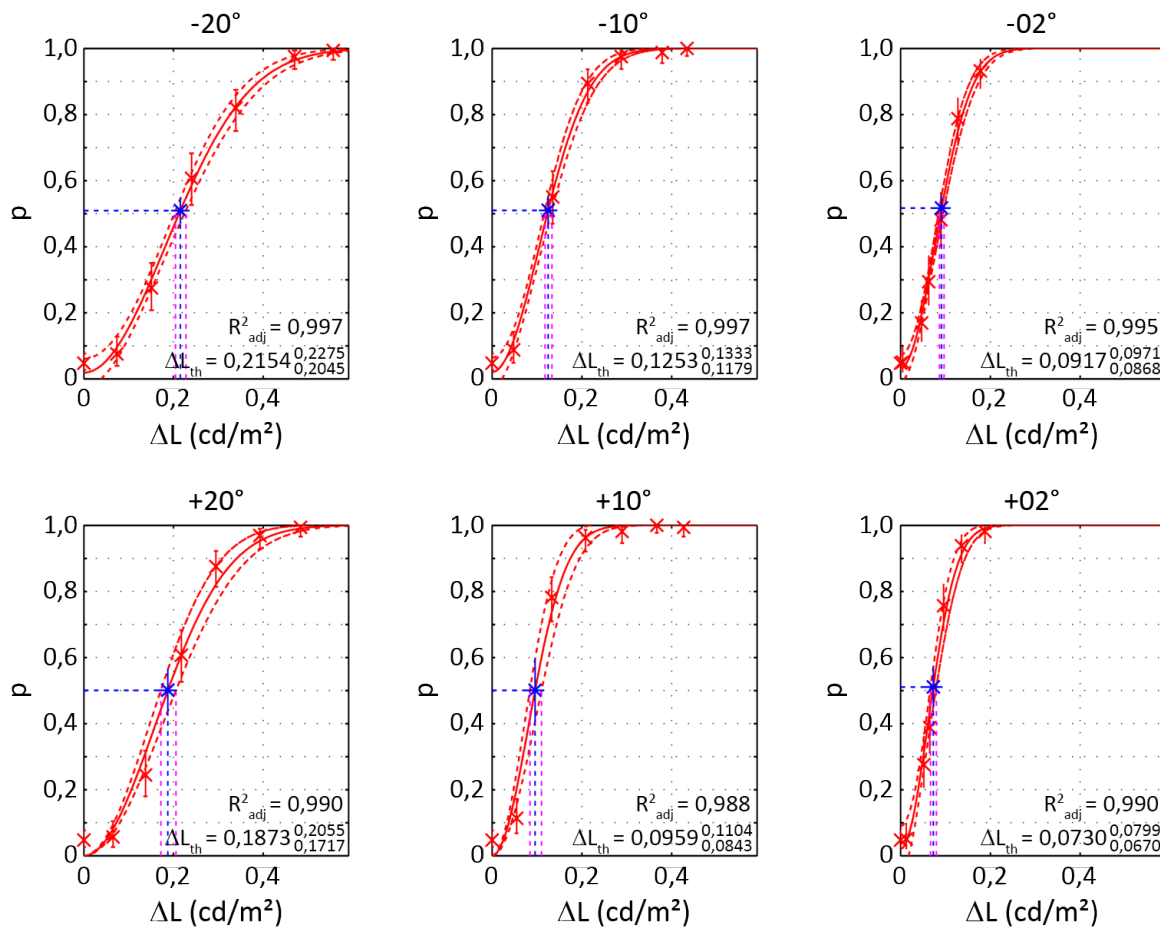


Abbildung A.1-7: Psychometrische Kurven für 2500-1,0-B+Rst.

Tabelle A.1-7: Leuchtdichteunterschiede der Testreize für 2500-1,0-B+Rst.

θ_{Obj} (°)	ΔL_1 (cd/m²)	ΔL_2 (cd/m²)	ΔL_3 (cd/m²)	ΔL_4 (cd/m²)	ΔL_5 (cd/m²)	ΔL_6 (cd/m²)
-20	0,0740	0,1510	0,2400	0,3390	0,4700	0,5560
-10	0,0480	0,1350	0,2130	0,2880	0,3790	0,4340
-02	0,0050	0,0470	0,0630	0,0900	0,1280	0,1780
+02	0,0130	0,0520	0,0650	0,0960	0,1360	0,1880
+10	0,0549	0,1327	0,2082	0,2896	0,3670	0,4266
+20	0,0651	0,1374	0,2175	0,2945	0,3927	0,4833

Versuchsreihe: 2500-1,0-B+Rsp

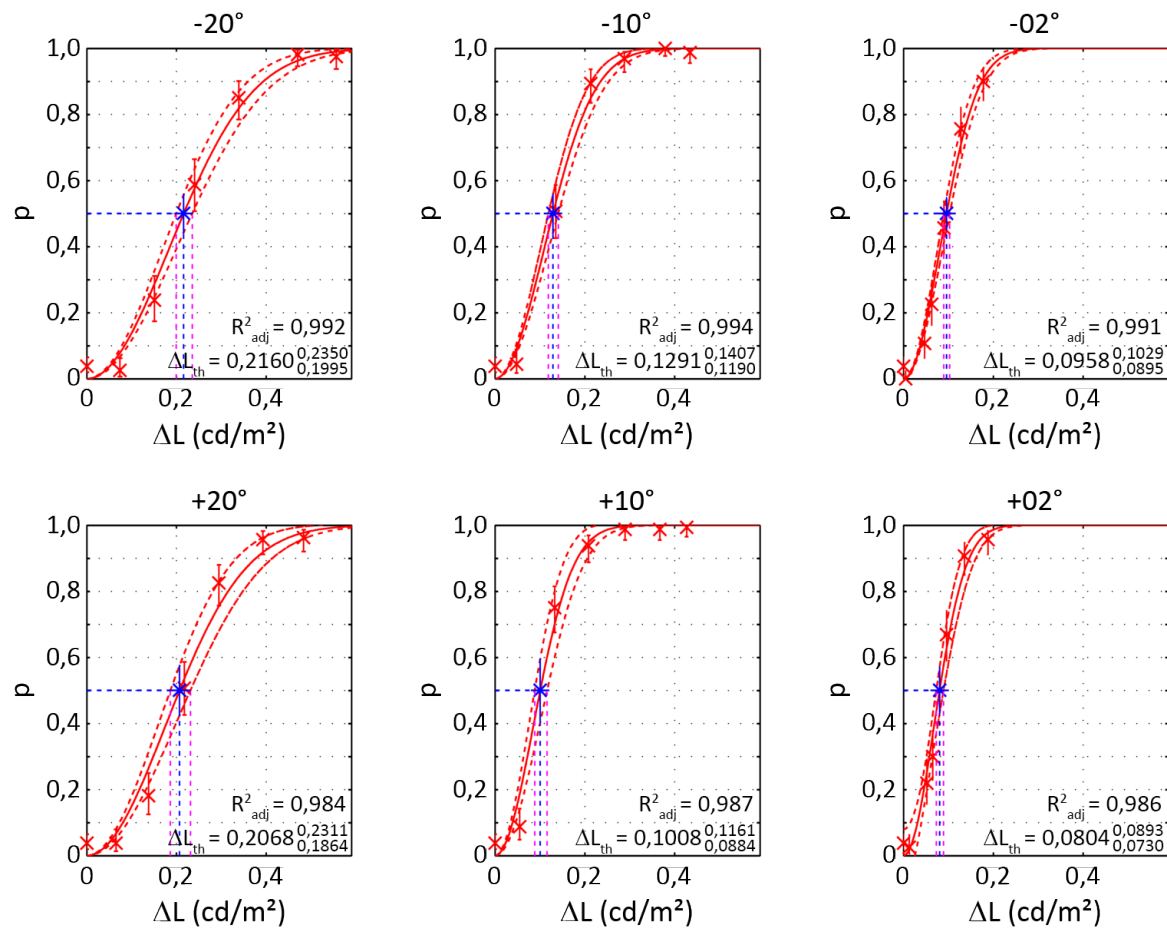


Abbildung A.1-8: Psychometrische Kurven für 2500-1,0-B+Rsp.

Tabelle A.1-8: Leuchtdichteunterschiede der Testreize für 2500-1,0-B+Rsp.

θ_{Obj} ($^\circ$)	ΔL_1 (cd/m^2)	ΔL_2 (cd/m^2)	ΔL_3 (cd/m^2)	ΔL_4 (cd/m^2)	ΔL_5 (cd/m^2)	ΔL_6 (cd/m^2)
-20	0,0740	0,1510	0,2400	0,3390	0,4700	0,5560
-10	0,0480	0,1350	0,2130	0,2880	0,3790	0,4340
-02	0,0050	0,0470	0,0630	0,0900	0,1280	0,1780
+02	0,0130	0,0520	0,0650	0,0960	0,1360	0,1880
+10	0,0549	0,1327	0,2082	0,2896	0,3670	0,4266
+20	0,0651	0,1374	0,2175	0,2945	0,3927	0,4833

Versuchsreihe: 4000-0,3-N

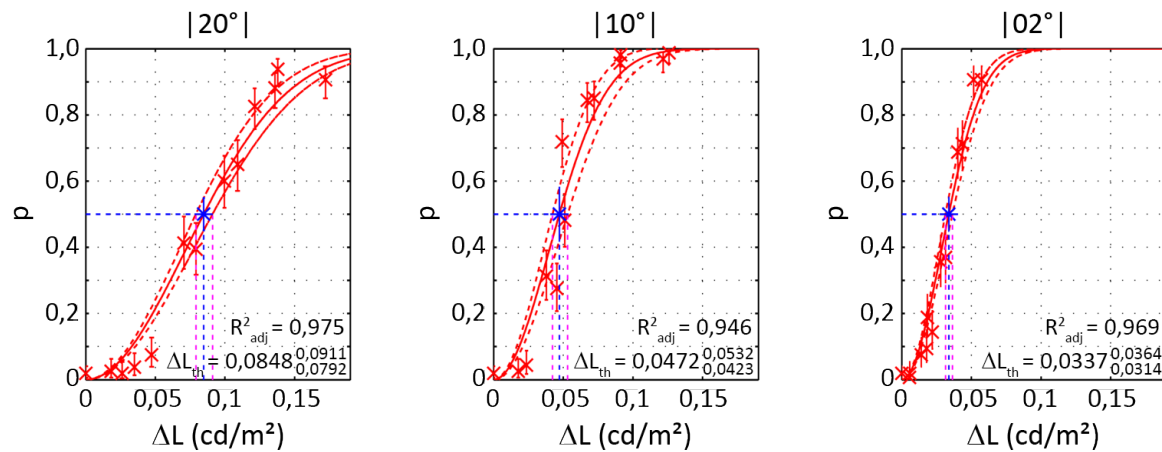


Abbildung A.1-9: Psychometrische Kurven für 4000-0,3-N.

Tabelle A.1-9: Leuchtdichteunterschiede der Testreize für 4000-0,3-N.

θ_{Obj} (°)	ΔL_1 (cd/m²)	ΔL_2 (cd/m²)	ΔL_3 (cd/m²)	ΔL_4 (cd/m²)	ΔL_5 (cd/m²)	ΔL_6 (cd/m²)
-20	0,0261	0,0473	0,0793	0,1091	0,1360	0,1722
-10	0,0236	0,0454	0,0511	0,0722	0,0908	0,1216
-02	0,0058	0,0141	0,0184	0,0280	0,0402	0,0517
+02	0,0056	0,0179	0,0220	0,0315	0,0435	0,0574
+10	0,0177	0,0379	0,0492	0,0672	0,0913	0,1259
+20	0,0183	0,0350	0,0705	0,0996	0,1214	0,1379

Versuchsreihe: 4000-1,0-N

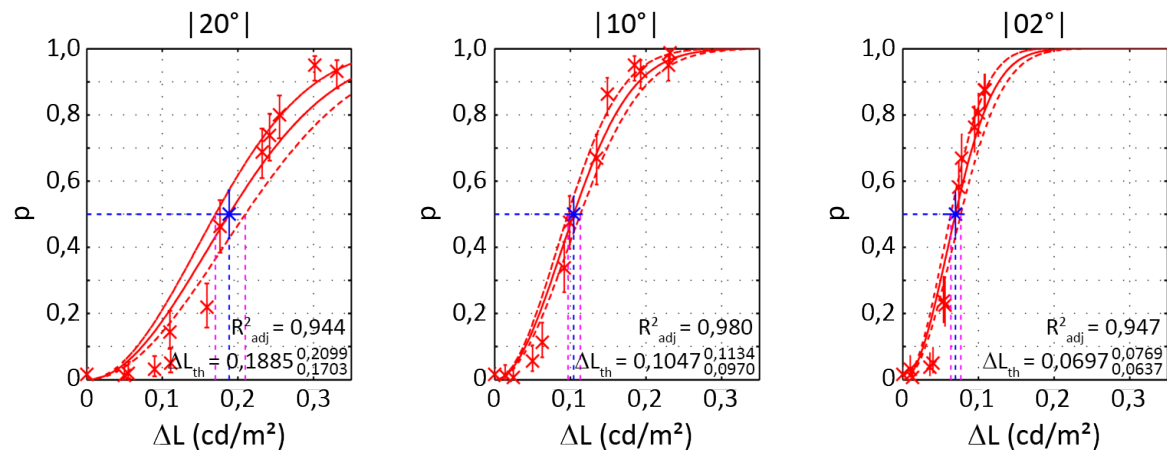


Abbildung A.1-10: Psychometrische Kurven für 4000-1,0-N.

Tabelle A.1-10: Leuchtdichteunterschiede der Testreize für 4000-1,0-N.

θ_{Obj} (°)	ΔL_1 (cd/m^2)	ΔL_2 (cd/m^2)	ΔL_3 (cd/m^2)	ΔL_4 (cd/m^2)	ΔL_5 (cd/m^2)	ΔL_6 (cd/m^2)
-20	0,0550	0,1110	0,1590	0,2320	0,2550	0,3310
-10	0,0250	0,0500	0,0920	0,1350	0,1930	0,2300
-02	0,0100	0,0360	0,0540	0,0740	0,0950	0,1090
+02	0,0130	0,0400	0,0560	0,0780	0,1000	0,1080
+10	0,0140	0,0630	0,0990	0,1490	0,1850	0,2320
+20	0,0499	0,0897	0,1101	0,1764	0,2421	0,3017

Versuchsreihe: 4000-3,0-N

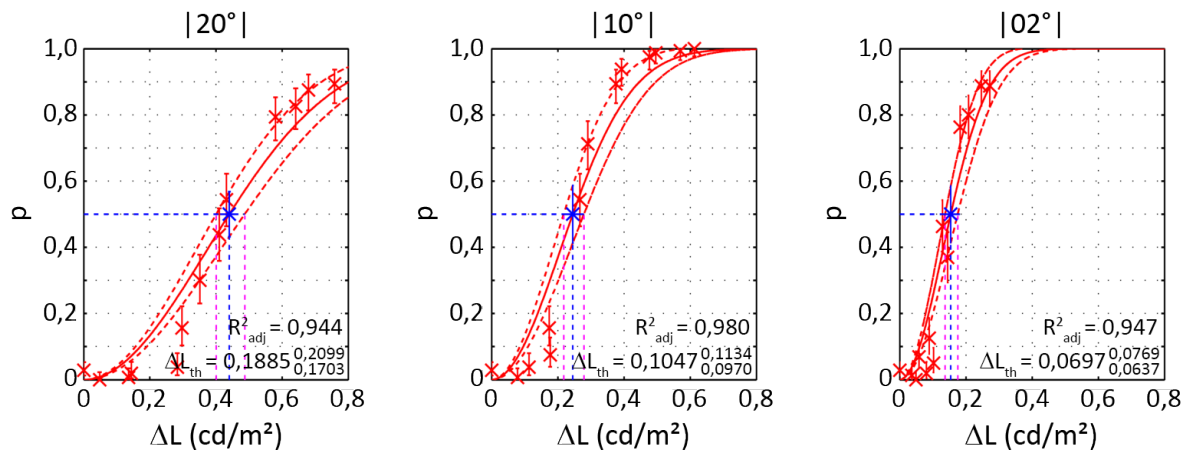


Abbildung A.1-11: Psychometrische Kurven für 4000-3,0-N.

Tabelle A.1-11: Leuchtdichteunterschiede der Testreize für 4000-3,0-N.

θ_{Obj} (°)	ΔL_1 (cd/m ²)	ΔL_2 (cd/m ²)	ΔL_3 (cd/m ²)	ΔL_4 (cd/m ²)	ΔL_5 (cd/m ²)	ΔL_6 (cd/m ²)
-20	0,1360	0,2830	0,3510	0,4320	0,6410	0,7590
-10	0,0780	0,1770	0,2670	0,3760	0,4770	0,5700
-02	0,0370	0,0580	0,0890	0,1290	0,1830	0,2470
+02	0,0490	0,0810	0,1020	0,1450	0,2080	0,2720
+10	0,1130	0,1740	0,2910	0,3930	0,4960	0,6130
+20	0,0480	0,1440	0,2970	0,4100	0,5800	0,6800

Versuchsreihe: 6000-0,3-N

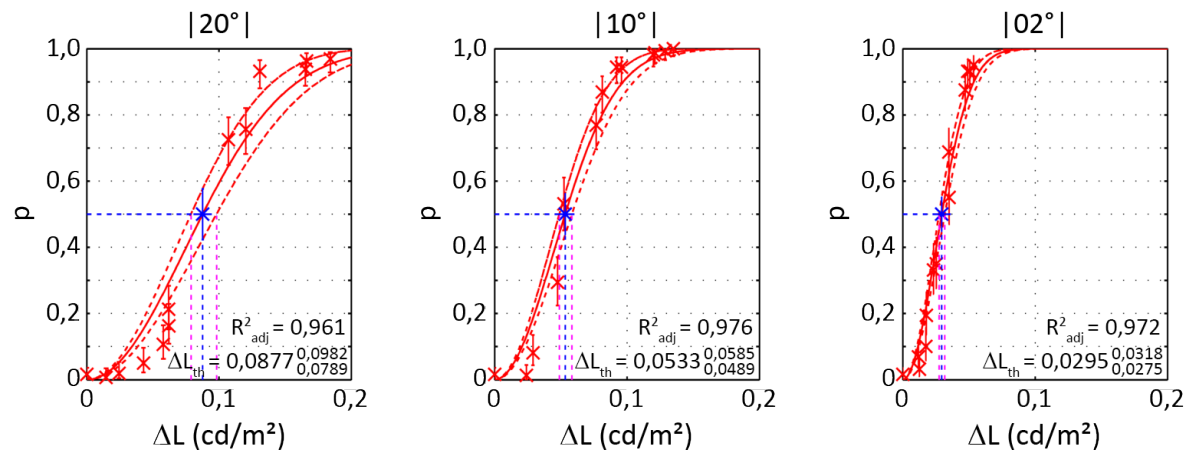


Abbildung A.1-12: Psychometrische Kurven für 6000-0,3-N.

Tabelle A.1-12: Leuchtdichteunterschiede der Testreize für 6000-0,3-N.

θ_{Obj} ($^\circ$)	ΔL_1 (cd/m^2)	ΔL_2 (cd/m^2)	ΔL_3 (cd/m^2)	ΔL_4 (cd/m^2)	ΔL_5 (cd/m^2)	ΔL_6 (cd/m^2)
-20	0,0146	0,0579	0,0621	0,1202	0,1654	0,1842
-10	0,0241	0,0475	0,0768	0,0959	0,1212	0,1351
-02	0,0119	0,0178	0,0232	0,0348	0,0472	0,0536
+02	0,0126	0,0175	0,0253	0,0351	0,0491	0,0507
+10	0,0290	0,0524	0,0813	0,0922	0,1200	0,1289
+20	0,0244	0,0429	0,0620	0,1072	0,1309	0,1662

Versuchsreihe: 6000-1,0-N

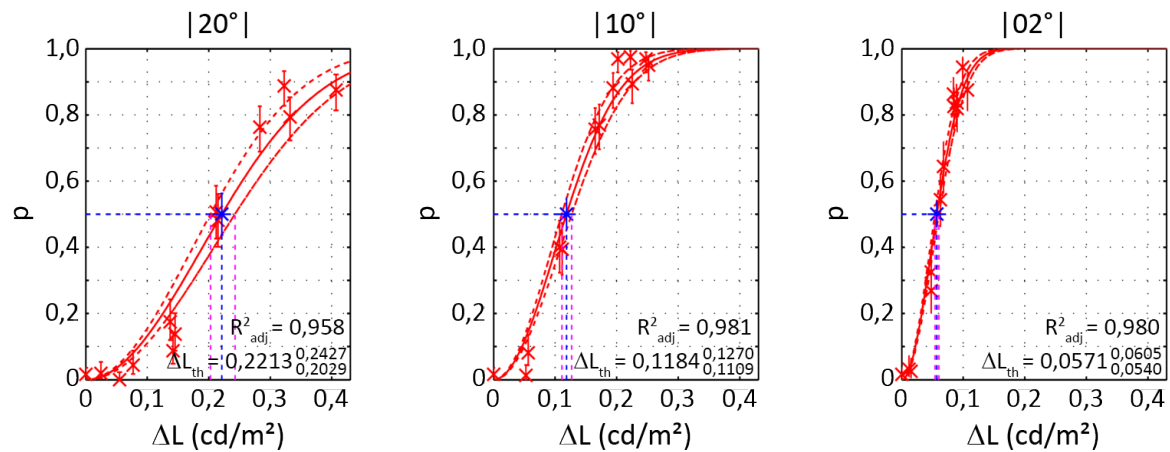


Abbildung A.1-13: Psychometrische Kurven für 6000-1,0-N.

Tabelle A.1-13: Leuchtdichteunterschiede der Testreize für 6000-1,0-N.

θ_{Obj} (°)	ΔL_1 (cd/m ²)	ΔL_2 (cd/m ²)	ΔL_3 (cd/m ²)	ΔL_4 (cd/m ²)	ΔL_5 (cd/m ²)	ΔL_6 (cd/m ²)
-20	0,0550	0,1420	0,1450	0,2150	0,3320	0,4070
-10	0,0526	0,1072	0,1651	0,2253	0,2474	0,2516
-02	0,0120	0,0480	0,0630	0,0850	0,0890	0,1070
+02	0,0150	0,0480	0,0680	0,0840	0,0900	0,0990
+10	0,0562	0,1113	0,1718	0,1941	0,2019	0,2223
+20	0,0247	0,0771	0,1374	0,2119	0,2830	0,3227

Versuchsreihe: 6000-3,0-N

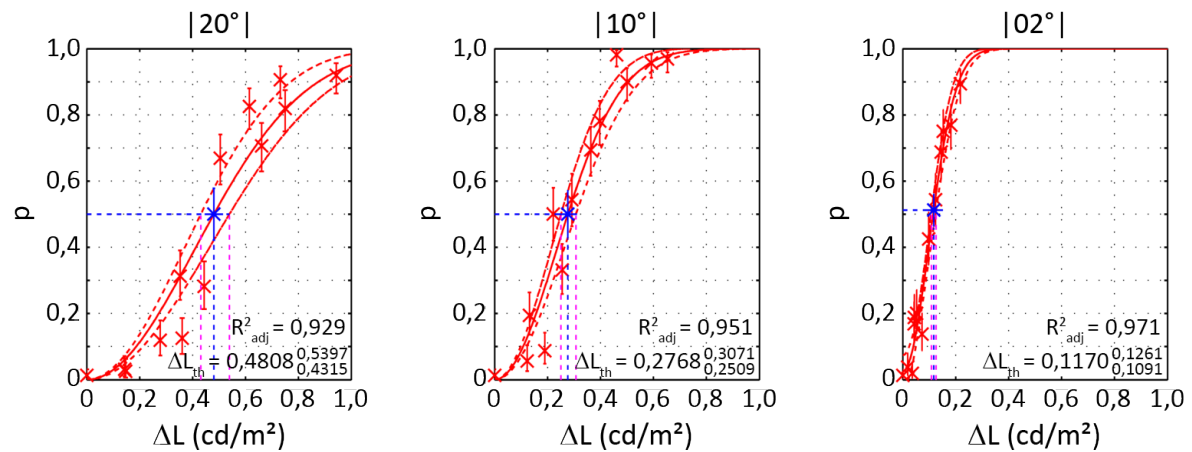


Abbildung A.1-14: Psychometrische Kurven für 6000-3,0-N.

Tabelle A.1-14: Leuchtdichteunterschiede der Testreize für 6000-3,0-N.

θ_{Obj} ($^\circ$)	ΔL_1 (cd/m²)	ΔL_2 (cd/m²)	ΔL_3 (cd/m²)	ΔL_4 (cd/m²)	ΔL_5 (cd/m²)	ΔL_6 (cd/m²)
-20	0,1470	0,3610	0,4440	0,6610	0,7500	0,9430
-10	0,1900	0,2550	0,2920	0,3630	0,5000	0,5920
-02	0,0360	0,0730	0,0430	0,0980	0,1450	0,1530
+02	0,0190	0,0530	0,0440	0,1240	0,1820	0,2180
+10	0,1230	0,1320	0,2220	0,3970	0,4610	0,6530
+20	0,1430	0,2780	0,3530	0,5050	0,6150	0,7320

Versuchsreihe: 6000-1,0-Rst

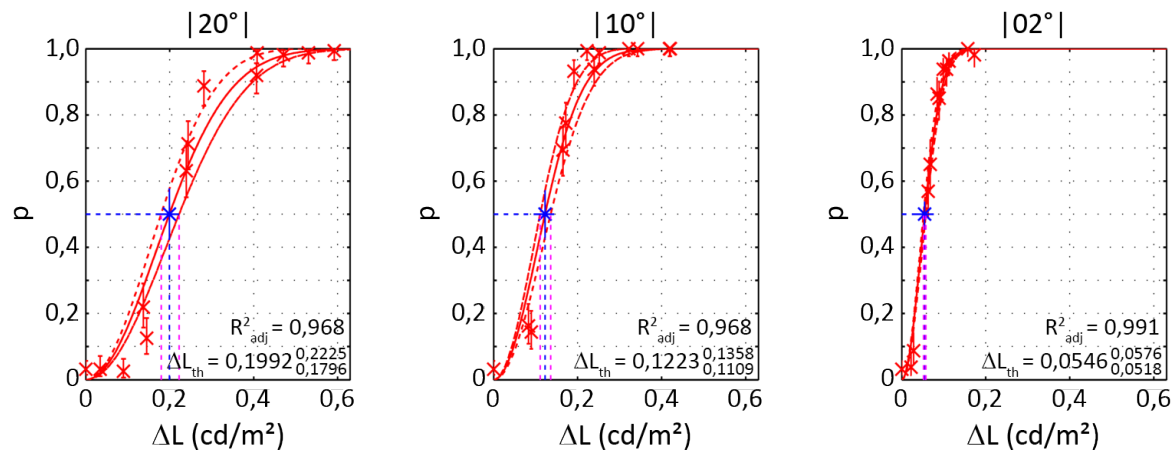


Abbildung A.1-15: Psychometrische Kurven für 6000-1,0-Rst.

Tabelle A.1-15: Leuchtdichteunterschiede der Testreize für 6000-1,0-Rst.

θ_{Obj} ($^\circ$)	ΔL_1 (cd/m^2)	ΔL_2 (cd/m^2)	ΔL_3 (cd/m^2)	ΔL_4 (cd/m^2)	ΔL_5 (cd/m^2)	ΔL_6 (cd/m^2)
-20	0,0900	0,1450	0,2440	0,4070	0,4710	0,5920
-10	0,0831	0,1651	0,2392	0,2516	0,3426	0,4186
-02	0,0220	0,0630	0,0890	0,1070	0,1130	0,1570
+02	0,0280	0,0680	0,0840	0,0990	0,1123	0,1730
+10	0,0895	0,1718	0,1911	0,2223	0,3219	0,4204
+20	0,0344	0,1374	0,2395	0,2815	0,4079	0,5307

Versuchsreihe: 6000-1,0-Rsp

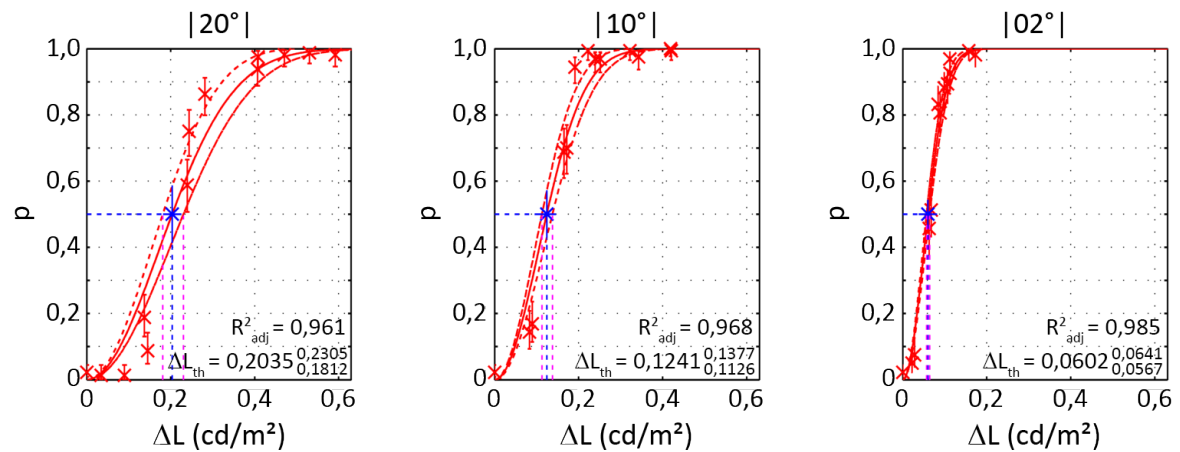


Abbildung A.1-16: Psychometrische Kurven für 6000-1,0-Rsp.

Tabelle A.1-16: Leuchtdichteunterschiede der Testreize für 6000-1,0-Rsp.

θ_{Obj} (°)	ΔL_1 (cd/m ²)	ΔL_2 (cd/m ²)	ΔL_3 (cd/m ²)	ΔL_4 (cd/m ²)	ΔL_5 (cd/m ²)	ΔL_6 (cd/m ²)
-20	0,0900	0,1450	0,2440	0,4070	0,4710	0,5920
-10	0,0831	0,1651	0,2392	0,2516	0,3426	0,4186
-02	0,0220	0,0630	0,0890	0,1070	0,1130	0,1570
+02	0,0280	0,0680	0,0840	0,0990	0,1123	0,1730
+10	0,0895	0,1718	0,1911	0,2223	0,3219	0,4204
+20	0,0344	0,1374	0,2395	0,2815	0,4079	0,5307

Versuchsreihe: 6000-1,0-B

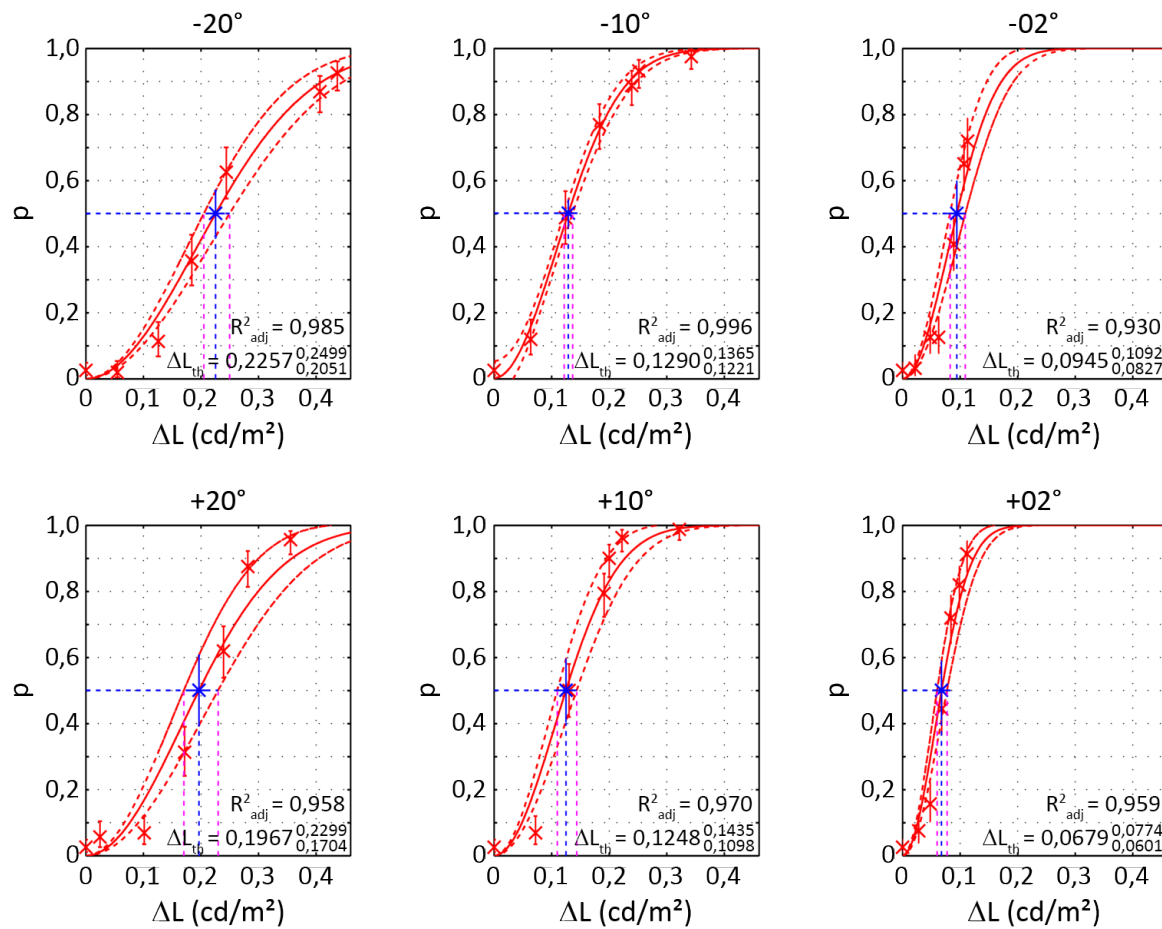


Abbildung A.1-17: Psychometrische Kurven für 6000-1,0-B.

Tabelle A.1-17: Leuchtdichteunterschiede der Testreize für 6000-1,0-B.

θ_{Obj} (°)	ΔL_1 (cd/m²)	ΔL_2 (cd/m²)	ΔL_3 (cd/m²)	ΔL_4 (cd/m²)	ΔL_5 (cd/m²)	ΔL_6 (cd/m²)
-20	0,0550	0,1260	0,1840	0,2440	0,4070	0,4370
-10	0,0637	0,1241	0,1830	0,2392	0,2516	0,3426
-02	0,0220	0,0480	0,0630	0,0890	0,1070	0,1130
+02	0,0280	0,0480	0,0680	0,0840	0,0990	0,1123
+10	0,0720	0,1301	0,1912	0,2001	0,2223	0,3219
+20	0,0247	0,1016	0,1718	0,2395	0,2815	0,3557

Versuchsreihe: 6000-1,0-B+Rst

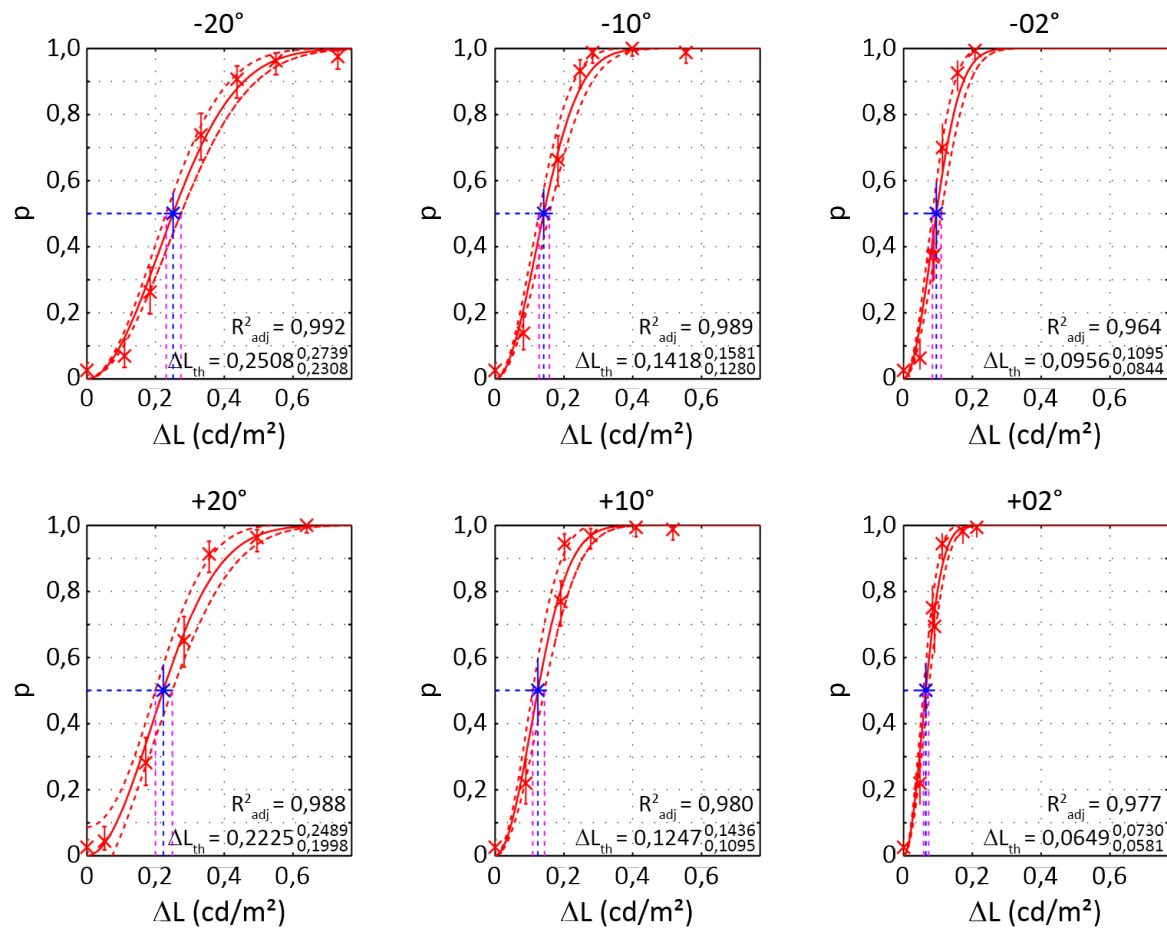


Abbildung A.1-18: Psychometrische Kurven für 6000-1,0-B+Rst.

Tabelle A.1-18: Leuchtdichteunterschiede der Testreize für 6000-1,0-B+Rst.

θ_{Obj} (°)	ΔL_1 (cd/m²)	ΔL_2 (cd/m²)	ΔL_3 (cd/m²)	ΔL_4 (cd/m²)	ΔL_5 (cd/m²)	ΔL_6 (cd/m²)
-20	0,1100	0,1840	0,3320	0,4370	0,5500	0,7300
-10	0,0831	0,1830	0,2474	0,2837	0,3991	0,5550
-02	0,0480	0,0850	0,0890	0,1130	0,1570	0,2080
+02	0,0480	0,0900	0,0840	0,1123	0,1730	0,2130
+10	0,0895	0,1912	0,2019	0,2780	0,4102	0,5167
+20	0,0516	0,1718	0,2830	0,3557	0,4952	0,6396

Versuchsreihe: 6000-1,0-B+Rsp

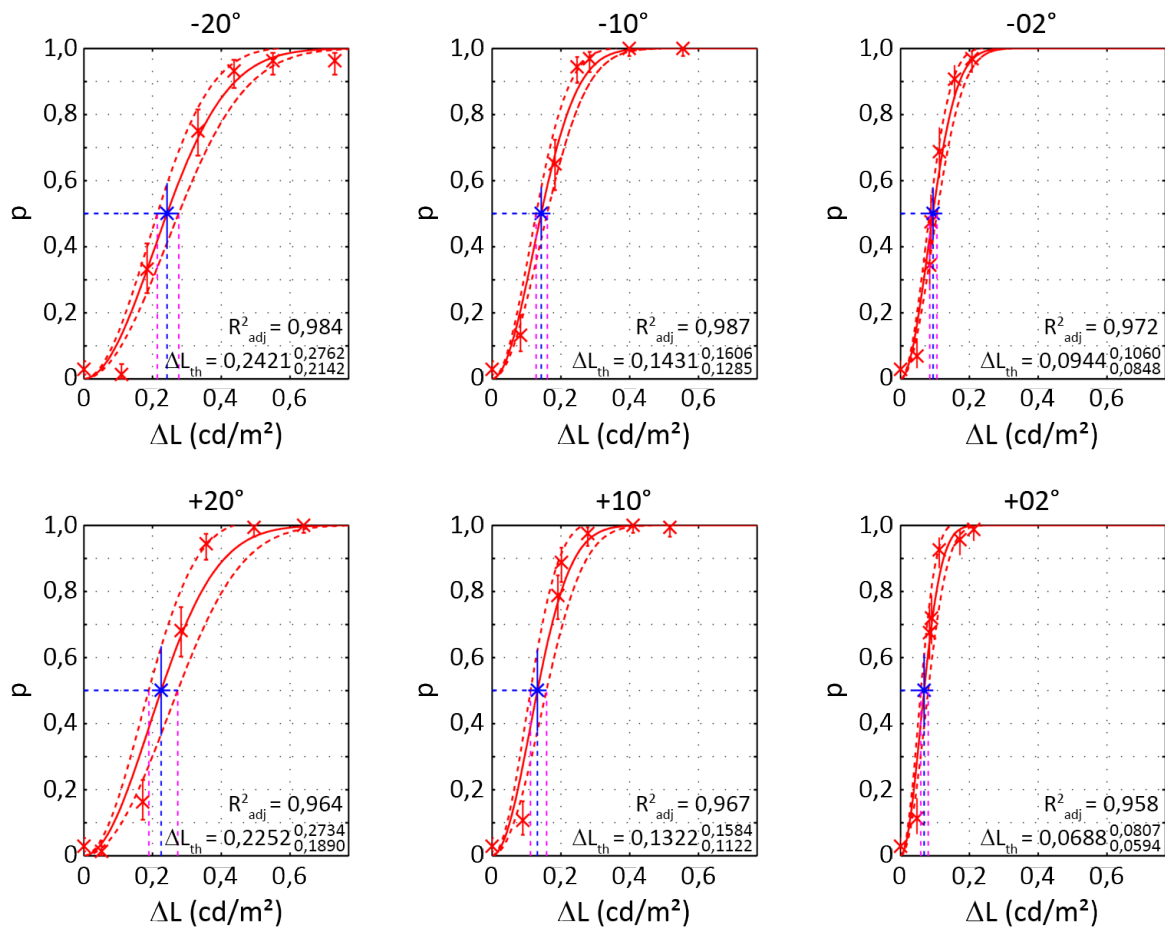


Abbildung A.1-19: Psychometrische Kurven für 6000-1,0-B+Rsp.

Tabelle A.1-19: Leuchtdichteunterschiede der Testreize für 6000-1,0-B+Rsp.

θ_{Obj} (°)	ΔL_1 (cd/m^2)	ΔL_2 (cd/m^2)	ΔL_3 (cd/m^2)	ΔL_4 (cd/m^2)	ΔL_5 (cd/m^2)	ΔL_6 (cd/m^2)
-20	0,1100	0,1840	0,3320	0,4370	0,5500	0,7300
-10	0,0831	0,1830	0,2474	0,2837	0,3991	0,5550
-02	0,0480	0,0850	0,0890	0,1130	0,1570	0,2080
+02	0,0480	0,0900	0,0840	0,1123	0,1730	0,2130
+10	0,0895	0,1912	0,2019	0,2780	0,4102	0,5167
+20	0,0516	0,1718	0,2830	0,3557	0,4952	0,6396

Versuchsreihe: Mint-0,3-N

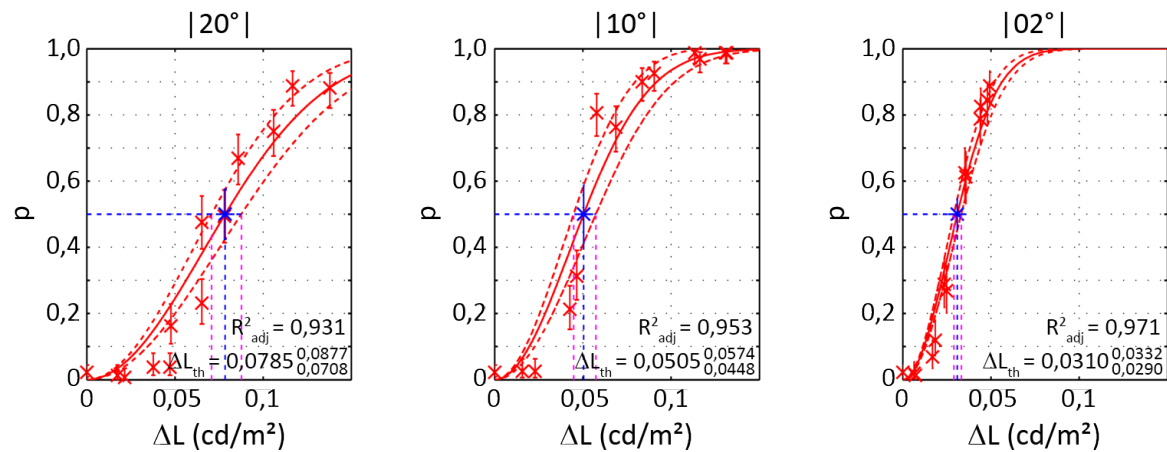


Abbildung A.1-20: Psychometrische Kurven für Mint-0,3-N.

Tabelle A.1-20: Leuchtdichteunterschiede der Testreize für Mint-0,3-N.

θ_{Obj} (°)	ΔL_1 (cd/m ²)	ΔL_2 (cd/m ²)	ΔL_3 (cd/m ²)	ΔL_4 (cd/m ²)	ΔL_5 (cd/m ²)	ΔL_6 (cd/m ²)
-20	0,0215	0,0472	0,0653	0,0781	0,1060	0,1379
-10	0,0157	0,0427	0,0687	0,0836	0,1164	0,1316
-02	0,0065	0,0169	0,0236	0,0353	0,0440	0,0493
+02	0,0072	0,0184	0,0249	0,0358	0,0442	0,0480
+10	0,0229	0,0466	0,0578	0,0904	0,1134	0,1308
+20	0,0175	0,0378	0,0477	0,0653	0,0859	0,1168

Versuchsreihe: Mint-1,0-N

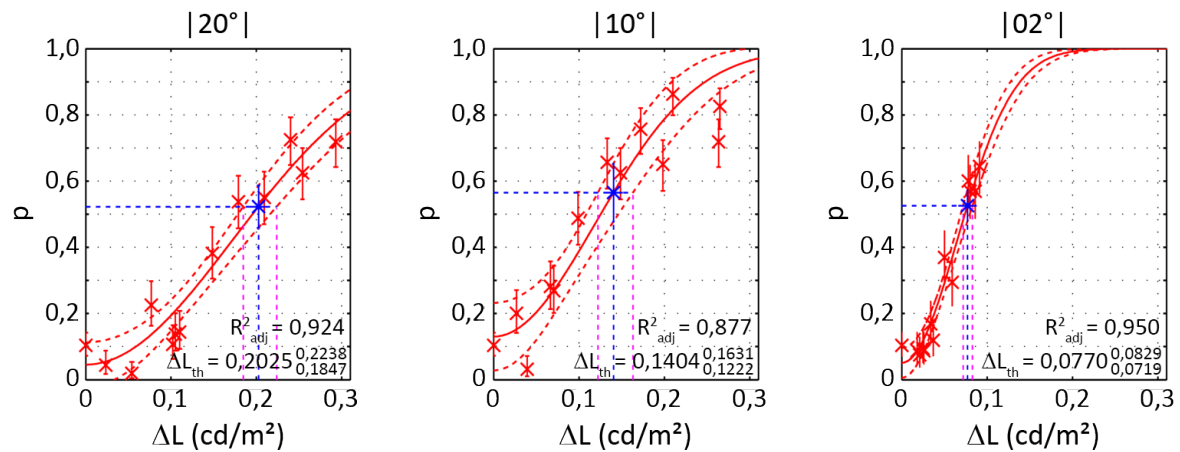


Abbildung A.1-21: Psychometrische Kurven für Mint-1,0-N.

Tabelle A.1-21: Leuchtdichteunterschiede der Testreize für Mint-1,0-N.

θ_{Obj} (°)	ΔL_1 (cd/m ²)	ΔL_2 (cd/m ²)	ΔL_3 (cd/m ²)	ΔL_4 (cd/m ²)	ΔL_5 (cd/m ²)	ΔL_6 (cd/m ²)
-20	0,0540	0,1050	0,1100	0,1790	0,2400	0,2930
-10	0,0392	0,0706	0,0990	0,1486	0,1983	0,2635
-02	0,0180	0,0260	0,0340	0,0500	0,0780	0,0800
+02	0,0210	0,0250	0,0370	0,0590	0,0860	0,0910
+10	0,0268	0,0666	0,1331	0,1723	0,2100	0,2649
+20	0,0235	0,0767	0,1020	0,1484	0,2091	0,2540

Versuchsreihe: Mint-3,0-N

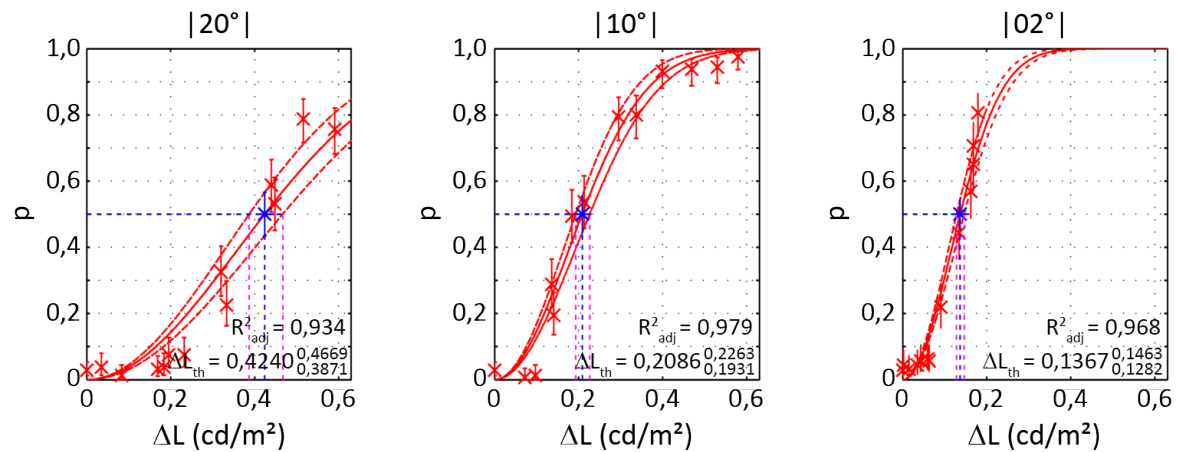


Abbildung A.1-22: Psychometrische Kurven für Mint-3,0-N.

Tabelle A.1-22: Leuchtdichteunterschiede der Testreize für Mint-3,0-N.

θ_{Obj} ($^\circ$)	ΔL_1 (cd/m^2)	ΔL_2 (cd/m^2)	ΔL_3 (cd/m^2)	ΔL_4 (cd/m^2)	ΔL_5 (cd/m^2)	ΔL_6 (cd/m^2)
-20	0,0830	0,1840	0,1950	0,3330	0,4480	0,5910
-10	0,0720	0,1360	0,1840	0,2950	0,3990	0,5300
-02	0,0150	0,0430	0,0630	0,0910	0,1620	0,1680
+02	0,0020	0,0350	0,0590	0,1340	0,1680	0,1790
+10	0,0970	0,1410	0,2130	0,3370	0,4690	0,5790
+20	0,0350	0,1690	0,2320	0,3200	0,4400	0,5160

A.2 Spektren der Adaptationsfelder

Dieser Teil des Anhangs enthält die relativen Spektralverläufe der in den Versuchen verwendeten Lichtfarben (2500 K, 4000 K, 6000 K, Mint). Die Darstellung erfolgt gruppiert für jedes untersuchte Adaptationsniveau (0,3; 1,0; 3,0 cd/m²).

Adaptationsleuchtdichte: $L_{\text{adapt}} = 0,3 \text{ cd/m}^2$

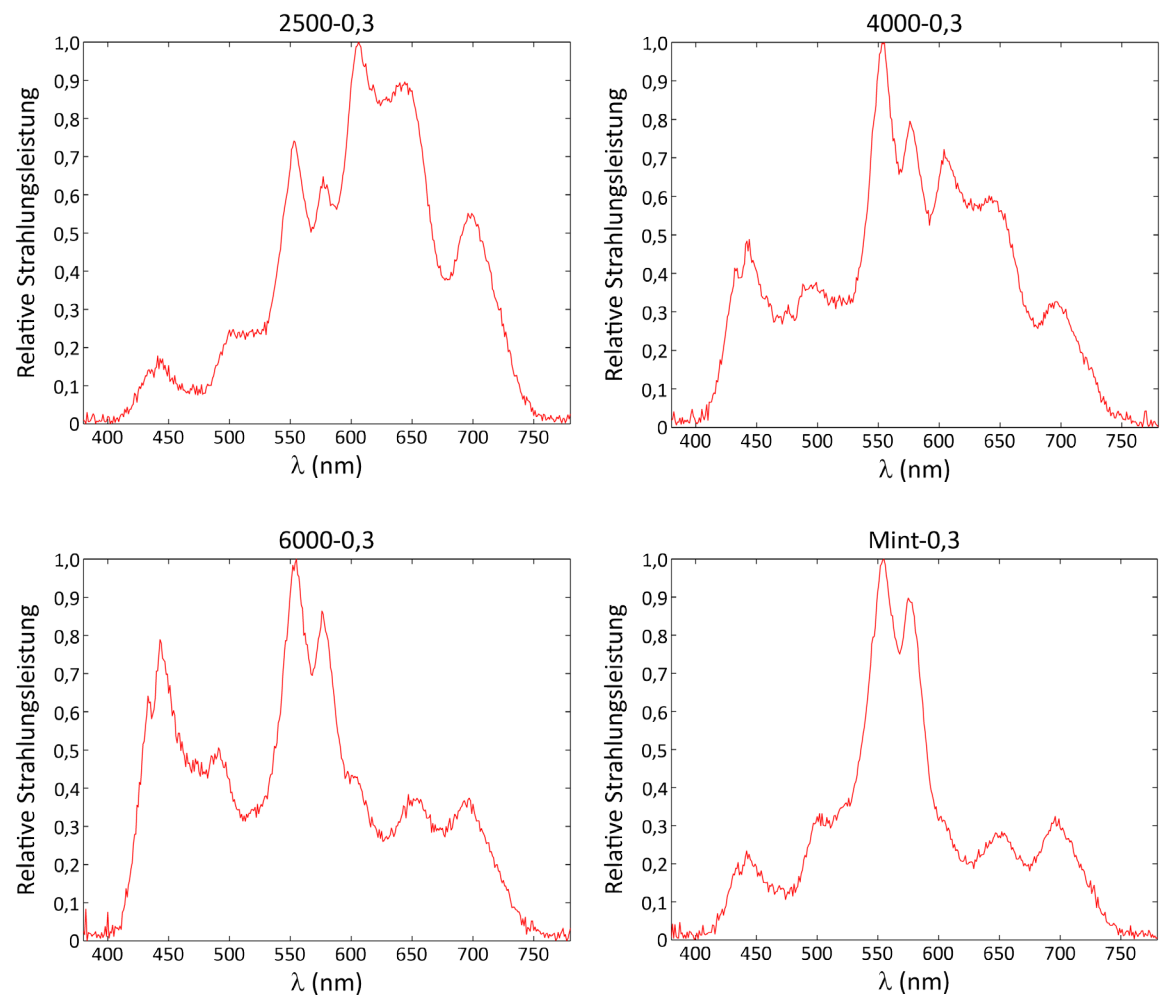


Abbildung A.2-1: Relative Spektralverläufe der adaptionsbestimmenden Lichtfarben von 2500 K (links oben), 4000 K (rechts oben), 6000 K (links unten) und Mint (rechts unten) bei $L_{\text{adapt}} = 0,3 \text{ cd/m}^2$.

Adaptationsleuchtdichte: $L_{\text{adapt}} = 1,0 \text{ cd/m}^2$

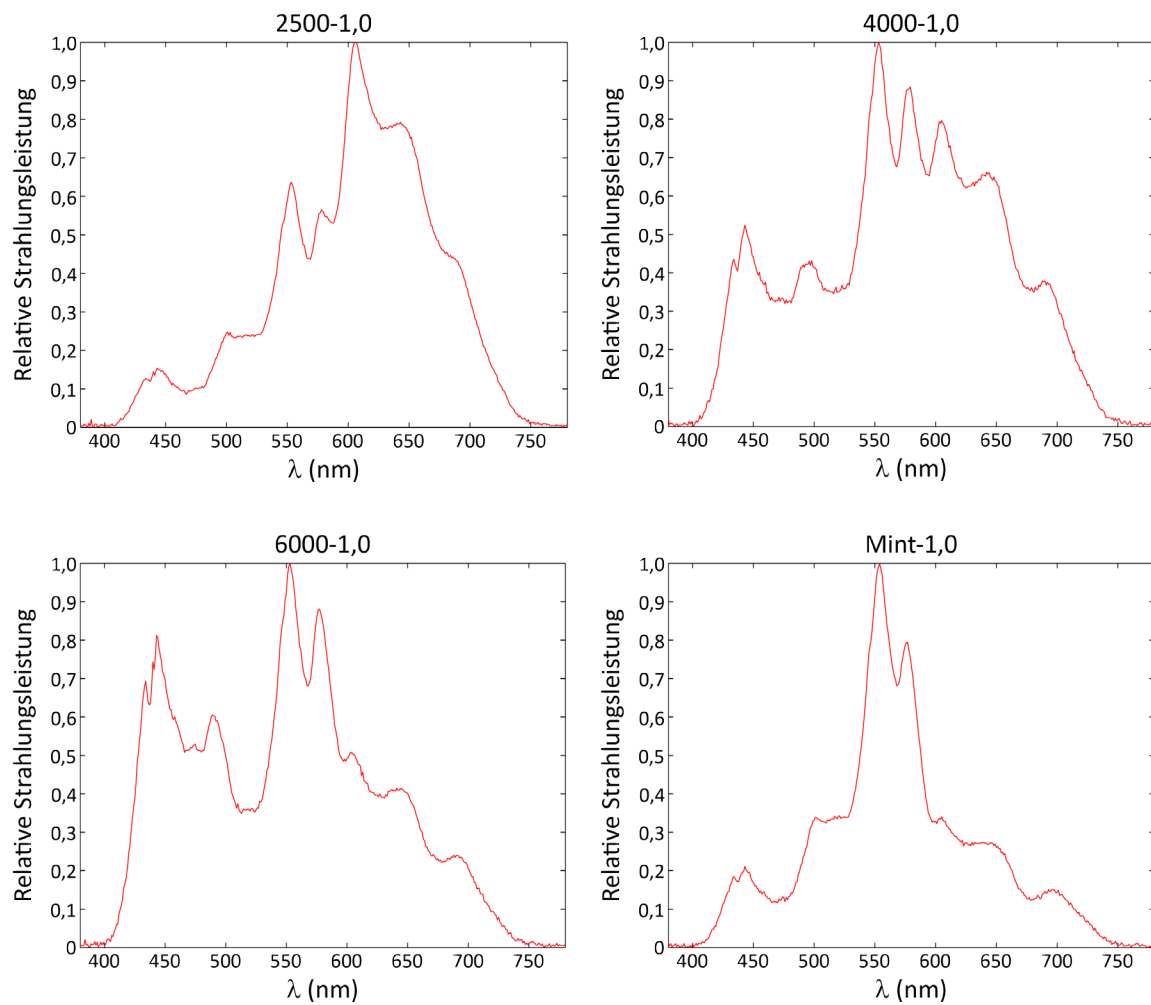


Abbildung A.2-2: Relative Spektralverläufe der adaptionsbestimmenden Lichtfarben von 2500 K (links oben), 4000 K (rechts oben), 6000 K (links unten) und Mint (rechts unten) bei $L_{\text{adapt}} = 1,0 \text{ cd/m}^2$.

Adaptationsleuchtdichte: $L_{\text{adapt}} = 3,0 \text{ cd/m}^2$

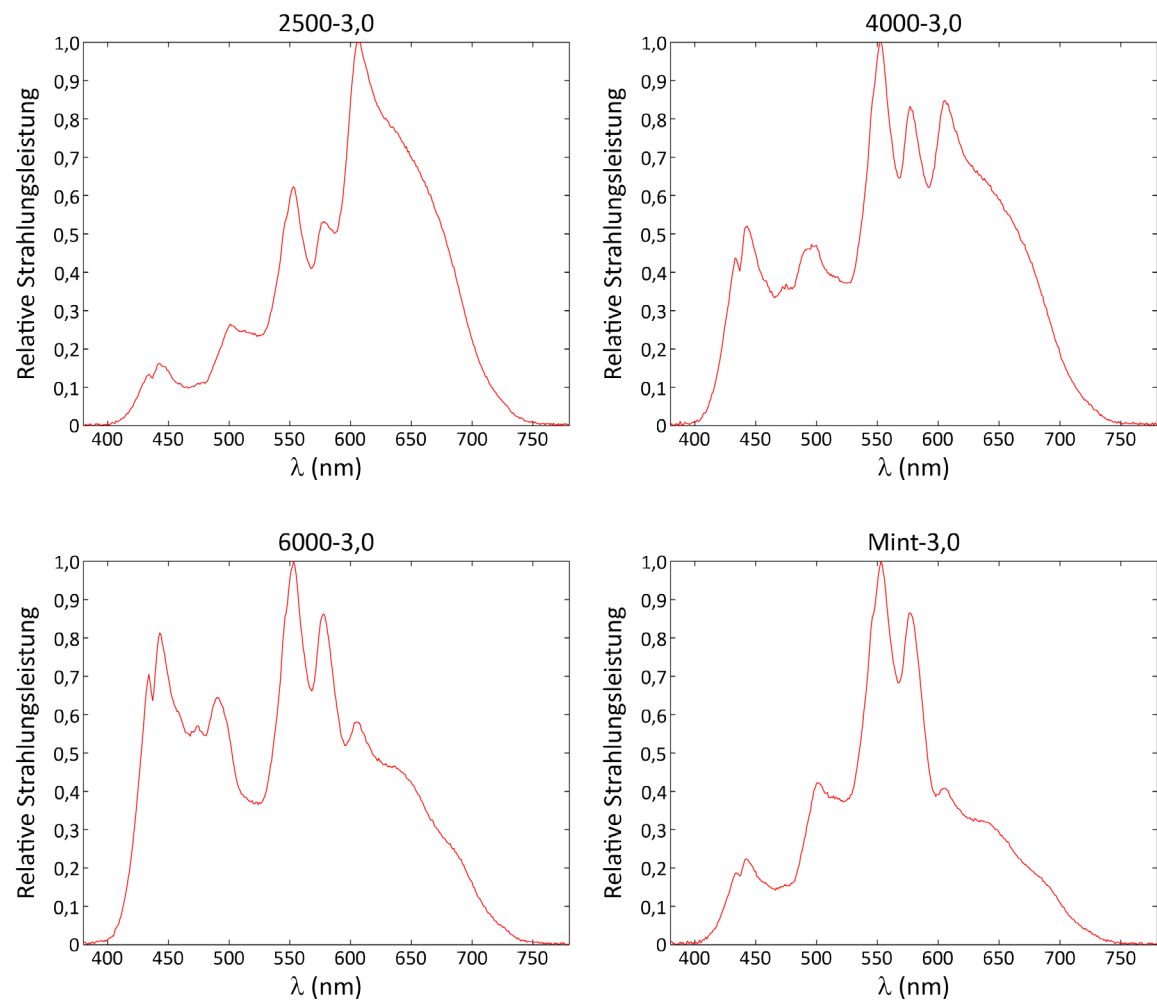


Abbildung A.2-3: Relative Spektralverläufe der adaptionsbestimmenden Lichtfarben von 2500 K (links oben), 4000 K (rechts oben), 6000 K (links unten) und Mint (rechts unten) bei $L_{\text{adapt}} = 3,0 \text{ cd/m}^2$.

A.3 Probandeninformation

Der nachfolgend abgedruckte Text wurde im Vorfeld der Untersuchungen an die Testpersonen versandt, um sie auf ihre Teilnahme vorzubereiten.

Sehr geehrte/r Teilnehmer/in,

vielen Dank für Ihre Teilnahme am Labortest. Mit diesem Schreiben erhalten Sie wichtige Informationen, die Ihnen zur Vorbereitung des Versuchs dienlich sind.

WELCHE AUFGABE KOMMT AUF MICH ZU?

Als Proband besteht Ihre Aufgabe darin, Sehobjekte zu detektieren (erkennen) und die Erkennbarkeit zu bewerten. Hierzu sitzen Sie in einem abgedunkelten Laboraufbau auf einem Stuhl und blicken auf eine Leinwand. Ihr Kopf liegt auf einer Kopfstütze auf. Für die Bewertung der Erkennbarkeit steht Ihnen ein Controller (Gamepad) zur Verfügung. Zusätzliche Reize können den Versuchsablauf beeinflussen. Wir bitten Sie daher, Ihr Mobiltelefon vor Beginn einer jeden Sitzung abzuschalten!!!

WIE LANGE DAUERT DIE UNTERSUCHUNG?

Jede Sitzung dauert 2 Stunden (inkl. kleiner Pausen). Die Untersuchung umfasst 4 Sitzungen. In Ihrer ersten Sitzung erhalten Sie eine Einführung in den Versuchsablauf. Diese Einführung hat zum Ziel, dass Sie die Sehaufgabe exemplarisch durchführen, um sich an das Antwortprozedere zu gewöhnen.

WAS ERWARTET MICH VOR ORT?

Wir sind bemüht, Ihre Teilnahme an dem Versuch so angenehm wie möglich zu gestalten. Der Versuch findet in einem geschlossenen Raum statt. Wir empfehlen Ihnen daher lockere, normale Kleidung. Bei Bedarf steht ein Heizgerät zur Verfügung. Für das Gemüt stellen wir eine Wasserflasche (0,5l) zur Verfügung und halten ein paar Snacks vor. Ebenso kann eine sanitäre Einrichtung genutzt werden.

WO UND WANN MUSS ICH MICH EINFINDEN?

Die Untersuchung findet in einem ehemaligen Supermarkt in Ilmenau (Ortsteil Unterpörlitz) statt. Dieser befindet sich im Gebäudekomplex an der Ecke „Ilmenauer Straße/Hohe Straße“. Der Eingang ist eine graue Tür, auf der das TUI-Logo als Hinweis angebracht ist. Für Autofahrer stehen kostenfreie Parkplätze in unmittelbarer Umgebung zur Verfügung. Fahrräder können im Versuchsraum geparkt werden. Für Ihre Teilnahme haben Sie Termine vereinbart. Wir bitten Sie um Pünktlichkeit, um unnötige Verzögerungen zu vermeiden. Bitte machen Sie sich durch Klopfen an der Eingangstür oder per Anruf bei Ihrem Versuchsleiter bemerkbar. Ihr Versuchsleiter wird Ihnen die Tür öffnen. Bitte beachten Sie: Es kann möglich sein, dass gerade noch ein Proband vor Ihnen im Versuch ist. Es kann daher einen Moment dauern, bis Ihnen die Tür geöffnet wird.

Wir bedanken uns für Ihre Teilnahme und hoffen, dass Sie Spaß an den Untersuchungen haben.

Mit freundlichen Grüßen,

Fachgebiet Lichttechnik der TU Ilmenau

■

A.4 Erläuterung der Sehaufgabe

Jede Versuchsperson erhielt zu Beginn ihrer ersten Versuchssitzung eine ausführliche Einführung in die Sehaufgabe (Tutorial). Zur Schaffung identischer Voraussetzungen für jede Testperson wurde die Erläuterung durch einen automatisierten Ablauf umgesetzt. Der nachfolgend abgedruckte Text wurde von einer computergenerierten Stimme wiedergegeben und parallel dazu durch visuelle Beispiele auf der Leinwand ergänzt. Das Tutorial verwendete eine Lichtfarbe von $\varphi_{\text{adapt}} = 4000 \text{ K}$ bei einem Leuchtdichteniveau von $L_{\text{adapt}} = 1,0 \text{ cd/m}^2$. Die in eckigen Klammern gefassten Aktionen wurden entweder akustisch oder visuell präsentiert.

Hallo [Dunkelgetastete Projektion],

Das Fachgebiet Lichttechnik begrüßt Sie herzlich und dankt Ihnen für Ihre Bereitschaft, als Proband an den Versuchsreihen teilzunehmen. Mit dieser Anleitung werden Sie mit dem Versuchsablauf vertraut gemacht. Bitte folgen Sie dieser Anleitung aufmerksam. Sollten Fragen entstehen, können Sie diese im Anschluss an diese Anleitung mit dem Versuchsleiter besprechen. Sie werden jetzt mit Ihrer Aufgabe vertraut gemacht. [Einblenden des Adaptationsfeldes]

IHRE AUFGABE ALS PROBAND

Der Versuch befasst sich mit der Erkennbarkeit von Sehobjekten unter verschiedenen Bedingungen. Hierfür werden Ihnen nacheinander Sehobjekte auf der Leinwand gezeigt. Ihre Aufgabe besteht darin, für jedes dargestellte Objekt zu beurteilen, ob Sie das Objekt erkennen können oder nicht. Ihre Beurteilung erfolgt per Tastendruck auf dem Controller. Sie erhalten jetzt einen Überblick über den strukturellen Ablauf der Versuche.

DER VERSUCHSABLAUF

Ihre Teilnahme am Versuch ist in 4 Sitzungen unterteilt [Grafische Animation zur Übersicht der 4 Sitzungen]. Heute ist Ihre erste Sitzung. Bei jeder Sitzung werden 6 Versuchsreihen durchgeführt. Jede Versuchsreihe besteht aus 4 Teilen [Grafische Animation zur Übersicht der 4 Phasen der Versuchsreihe]: Die ‚Startphase‘, die ‚Adaptationsphase‘, die ‚Testphase‘ und das ‚Ende‘.

Die Startphase bereitet die aktuelle Versuchsreihe vor. Diese Phase dauert nur wenige Sekunden. In der Adaptationsphase gewöhnen sich Ihre Augen an die Versuchsbedingungen. Diese Phase dauert 2 Minuten. In der Testphase findet Ihre Sehaufgabe statt. Es werden insgesamt 190 Sehobjekte nacheinander gezeigt. Hierzu ist die Testphase in Szenen unterteilt [Grafische Animation zur Szeneneinteilung]. Jede Szene zeigt ein Sehobjekt. Jedes Sehobjekt wird akustisch durch diesen Signalton begleitet: [Sinuston, 440 Hz, 100 ms]. Bitte beurteilen Sie die Erkennbarkeit des Objektes so schnell wie möglich. Nutzen Sie hierfür die Tasten auf dem Controller. Mit Ihrem Tastendruck wird die Szene automatisch beendet und Sie hören die von Ihnen getätigte Antwort. Für Ihre Antwort haben Sie maximal 2 Sekunden Zeit. Dann wird die Szene automatisch beendet. In diesem Fall hören Sie folgenden Signalton: [Sinuston, 1000 Hz, 100 ms]. Nachdem eine Szene beendet wurde, folgt automatisch die darauffolgende Szene. Nachdem alle 190 Szenen gezeigt wurden, wird die Versuchsreihe beendet.

Sie werden akustisch durch die einzelnen Phasen geführt [Grafische Animation zur akustischen Führung]. Zu Beginn der Versuchsreihe hören Sie „Es geht los“. Zu Beginn der Adaptationsphase

hören Sie: „Die Adaptationsphase beginnt“. Zu Beginn der Testphase hören Sie: „Der Test beginnt“. Am Ende hören Sie: „Der Test ist beendet“. Nun kennen Sie den strukturellen Ablauf des Versuches [Ausblenden der grafischen Animation]. Sie werden nun mit den Details der Versuchsdurchführung vertraut gemacht.

DER FIXATIONSPUNKT

[Fixationspunkt einblenden] In der Mitte der Leinwand sehen Sie nun einen kleinen Kreis mit 4 Peillinien. Dies ist der Fixationspunkt. Bitte richten Sie Ihren Blick stets auf den Fixationspunkt. Sie sollten also in diesem Moment auf den Punkt schauen.

DAS SEHOBJEKT

Bei dem Sehobjekt handelt es sich um ein kleines Quadrat [Sehobjekt +2° einblenden], welches Sie jetzt vor sich sehen. Die Position und Helligkeit des Sehobjektes variieren im Verlauf des Versuchs [Sehobjekt +2° ausblenden]. Es gibt insgesamt sechs verschiedene Positionen, an denen das Sehobjekt erscheinen kann. Um Ihnen ein Gefühl zu vermitteln, werden diese sechs Positionen nun nacheinander auf der Leinwand gezeigt. Wie Sie erkennen, gibt es drei Positionen links vom Fixationspunkt [Sehobjekte -20°, -10°, -2° einblenden] und drei Positionen rechts vom Fixationspunkt [Sehobjekte +2°, +10°, +20° einblenden]. Bitte beachten Sie [alle Sehobjekte bis auf +10° ausblenden], dass das Sehobjekt pro Szene nie gleichzeitig an mehr als einer Position auftreten wird. Pro Szene kann maximal nur ein Sehobjekt auftreten.

Das gerade gezeigte Sehobjekt hat die maximal mögliche Helligkeit. Im Verlauf des Versuchs können also nur Sehobjekte auftreten, die gleich hell oder dunkler sind als das gerade gezeigte. Das Sehobjekt wird nun wieder ausgeblendet [Sehobjekt +10° ausblenden].

Die Darbietungszeit des Sehobjektes ist im Versuch sehr kurz. Hierzu sehen Sie ein Beispiel, in dem das Sehobjekt rechts vom Fixationspunkt gezeigt wird. Die Darstellung des Objektes wird durch einen Signalton begleitet [Sehobjekt +10° für 200ms einblenden, zusammen mit Sinuston, 440 Hz, 100 ms].

Prima! Mit dem Fixationspunkt und dem Sehobjekt kennen Sie nun die elementaren Bestandteile einer Szene. Jetzt folgt eine kurze Erklärung zur Tastenbelegung des Controllers.

DER CONTROLLER

Mit dem Controller geben Sie Ihre Antwort zu jeder Szene ab. Für Ihr Urteil zur Erkennbarkeit der Objekte gibt es drei Antwortmöglichkeiten.

- Möglichkeit 1:
Sie erkennen das Objekt links vom Fixationspunkt. Drücken Sie dann die Taste für ‚Links‘.
- Möglichkeit 2:
Sie erkennen das Objekt rechts vom Fixationspunkt. Drücken Sie dann die Taste für ‚Rechts‘.
- Möglichkeit 3:
Sie erkennen kein Objekt. Drücken Sie dann die Taste für ‚Nein‘.

Um ein Gefühl für den Tastendruck zu entwickeln, probieren Sie es doch mal aus. Die Tasten sind für die nächsten 10 Sekunden aktiviert. [Versuchsperson übt mit Controller].

[nach 10 s: Controller wird deaktiviert] Prima! Wie Sie bemerkt haben, wird Ihre getroffene Antwort vom System akustisch wiedergegeben. Dieses Feedback dient zur eigenen Kontrolle. Auf diese Art wissen Sie, dass Ihr Tastendruck registriert wurde. Weiterhin besteht die Möglichkeit,

eine getätigte Antwort zu korrigieren. Sollten Sie versehentlich eine falsche Taste betätigt haben, können Sie Ihre beabsichtigte Antwort dem Versuchsleiter per Zuruf mitteilen.

Die Anleitung ist nun beendet. Bitte bleiben Sie sitzen. Sie können jetzt Fragen stellen und dann den Versuchsablauf an einem Beispiel üben [Adaptationsfeld ausblenden]. ■

Im direkten Anschluss an dieses automatisiert ablaufende Tutorial begann die Dunkeladaptation mit einer Dauer von 12 Minuten (vgl. Abschnitt 4.5.3). Während dieser Zeit wurden etwaige offene Fragen der Versuchsperson mit dem Versuchsleiter besprochen. Zudem wurden jeder Versuchsperson noch die nachfolgenden Hinweise in einer kurzen mündlichen Mitteilung durch den Versuchsleiter gegeben:

- *DER VERSUCH IST KEIN ‚LEISTUNGSTEST‘
Es geht nicht darum, Ihre ‚Leistung‘ zu testen. Es gibt keinen schnelleren oder besseren Probanden. Alle Testpersonen sind gleichwertig. Zweifeln Sie daher nicht an sich, wenn Sie auch häufig hintereinander meinen, nichts zu erkennen. Dies kann durchaus vorkommen!*
- *REAKTION BEI FALSCHER ANTWORT
Wenn Sie aus Versehen eine falsche Taste gedrückt haben, dann teilen Sie dies dem Versuchsleiter bitte durch unmittelbaren Zuruf mit.*
- *SUCHEN SIE DIE KOMMUNIKATION MIT DEM VERSUCHSLEITER
Läuft die Versuchsreihe zu schnell oder benötigen Sie eine zusätzliche Pause? Teilen Sie bitte Ihre Anliegen dem Versuchsleiter mit!* ■

Abbildungsverzeichnis

Kapitel 2

Abb. 2-1:	Testszenario zur Objektdetektion unter praxisnahen Bedingungen auf einem Straßenzug im Industriegebiet von Ilmenau [Foto: I. HERZOG, Ilmenau].....	9
Abb. 2-2:	Horizontalschnitt des Auges [Grafik nach: TALOS und JAKOV, GFDL].	11
Abb. 2-3:	Retinaler Aufbau des Auges [Grafik nach: P. HARTMANN, GFDL].	11
Abb. 2-4:	Relative spektrale Hellempfindlichkeitskurven der Stäbchen (blau) und Zapfen (rot) [Grafik nach: CH. SCHIERZ, Ilmenau].	12
Abb. 2-5:	Relative spektrale Empfindlichkeitskurven der S- (blau), M- (grün) und L-Zapfen (rot) [Grafik nach: CH. SCHIERZ, Ilmenau].....	13
Abb. 2-6:	Örtliche Verteilung von Stäbchen (blau) und Zapfen (rot) auf der Retina [Grafik nach: CH. SCHIERZ, Ilmenau].....	14
Abb. 2-7:	Zeitlicher Verlauf der Leuchtdichteunterschiedsschwelle (ΔL_{th}) bei Dunkeladaptation [Grafik nach: CH. SCHIERZ, Ilmenau].	16
Abb. 2-8:	Sehobjekte in Form quadratischer Grautafeln mit verschiedenen Reflexionsgraden [Foto: I. HERZOG, Ilmenau].....	19

Kapitel 4

Abb. 4-1:	Visualisierung der Versuchsanordnung.	48
Abb. 4-2:	Referenzpunkt der Versuchsumgebung (Festlegung mittels idealer Blickachse, Darstellung mittels Lasermarkierung).	49
Abb. 4-3:	Versuchsaufbau [Foto: I. HERZOG, Ilmenau].	51
Abb. 4-4:	Technische Zeichnung des Versuchsaufbaus in der Seitenansicht.	52
Abb. 4-5:	Betriebsstabilität des Projektors.	53
Abb. 4-6:	Projektor mit vorgesetzten ND-Filtern [Foto: I. HERZOG, Ilmenau].	53
Abb. 4-7:	Leuchtdichteverteilung des Adaptationsfeldes ohne (oben) und mit Gleichmäßigkeitskorrektur (unten).	55
Abb. 4-8:	Relative Spektralverläufe der untersuchten Lichtfarben für $L_{adapt} = 1,0 \text{ cd/m}^2$	56
Abb. 4-9:	Blendquelle (links) und Detail eines der beiden in der Blendquelle enthaltenen LED-Clusters (rechts) [Fotos: I. HERZOG, Ilmenau].	57
Abb. 4-10:	Anordnung der Blendquellen mit Testbild (oben) und im Versuch (unten) (Fotos: I. HERZOG, Ilmenau).	58
Abb. 4-11:	Beregnungsanlage mit Düsen (links) und Hauptventil (rechts) [Fotos: I. HERZOG, Ilmenau].	61
Abb. 4-12:	Benutzeroberfläche der Steuerung für den automatisierten Ablauf der Versuchsreihen.	62

Abb. 4-13:	Steuerungsinfrastruktur des Laboraufbaus.....	63
Abb. 4-14:	Altersverteilung des Probandenkollektivs.....	64
Abb. 4-15:	Ablauf einer Versuchsreihe.	66
Abb. 4-16:	Versuchsbild bei der Lichtfarbe Mint mit einer Detailansicht von Fixationspunkt und Sehobjekt an Position $\Theta_{\text{Obj}} = +10^\circ$	68
Abb. 4-17:	Ablauf der Versuchssitzung.	70
Abb. 4-18:	Häufigkeitsverteilungen der Falschalarmrate (p_{FA}) und der Rate korrekter Verneinungen (p_{KV}).	72
Abb. 4-19:	Psychometrische Kurven von Versuchsperson-Nr. 24 bei Normalbedingungen mit $\varphi_{\text{adapt}} = 4000 \text{ K}$ und $L_{\text{adapt}} = 1,0 \text{ cd/m}^2$ (Individuallschwelle).....	75
Abb. 4-20:	Probleme des Regressionsmodells bei Individuallschwelle: Breite Konfidenzschläuche (links) oder keine Modellbildung (rechts).	75
Abb. 4-21:	Psychometrische Kurven aller 32 Versuchspersonen bei Normalbedingungen mit $\varphi_{\text{adapt}} = 4000 \text{ K}$ und $L_{\text{adapt}} = 1,0 \text{ cd/m}^2$ (Kollektivschwelle).....	76
Abb. 4-22:	Psychometrische Kurven aller 32 Versuchspersonen bei Normalbedingungen mit $\varphi_{\text{adapt}} = 4000 \text{ K}$ und $L_{\text{adapt}} = 1,0 \text{ cd/m}^2$ (Kollektivschwelle) für zusammengefasste Objektpositionen.	77
Abb. 4-23:	Varianzhomogenität der standardisierten Residuen.	81
Abb. 4-24:	Testbild zur Validierung der Sehobjektpositionen.	84
Abb. 4-25:	Validierung der Sehobjektpositionen mittels LMK-Winkeldaten.	84
Abb. 4-26:	Validierung der Blendquellenpositionen mittels LMK-Winkeldaten.	86
Abb. 4-27:	Form, Größe und Position der Messregionen zur Bestimmung der Leuchtdichteunterschiede zwischen Sehobjekt und Umgebung am Beispiel der Objektpositionen $\Theta_{\text{Obj}} = \pm 2^\circ$	88
Kapitel 5		
Abb. 5-1:	Leuchtdichteschwelle bei normalen Sehbedingungen.	94
Abb. 5-2:	Genereller Einfluss des Adaptationsniveaus auf die Detektions- schwelle bei normalen Sehbedingungen.	98
Abb. 5-3:	Genereller Einfluss der Objektposition auf die Detektionsschwelle bei normalen Sehbedingungen.	99
Abb. 5-4:	Genereller Einfluss der Lichtfarbe auf die Detektionsschwelle bei normalen Sehbedingungen.	100
Abb. 5-5:	Einfluss der Wechselwirkungen zwischen Lichtfarbe und Helligkeitsniveau (links) sowie Lichtfarbe und Objektposition (rechts) auf die Detektionsschwelle.....	101
Abb. 5-6:	Zapfenaktivitäten, berechnet nach [Vos 1978].	103
Abb. 5-7:	Leuchtdichteschwelle bei Regen.	105
Abb. 5-8:	Genereller Einfluss der Regenart auf die Detektionsschwelle.	107

Abb. 5-9:	Einfluss der Wechselwirkung zwischen Lichtfarbe und Regenart auf die Detektionsschwelle.	108
Abb. 5-10:	Leuchtdichteschwellen bei Blendung mit und ohne Regen.	109
Abb. 5-11:	Einfluss der Wechselwirkung zwischen Lichtfarbe und Blendung auf die Detektionsschwelle.	111
Abb. 5-12:	Einfluss der Objektposition auf die Detektionsschwelle mit dem Parameter Blendung.	112
Abb. 5-13:	Effektiv wirksame Schleierleuchtdichte der 5 Blendquellen an den untersuchten Objektpositionen sowie am Fixationspunkt ($\theta_{\text{Obj}} = 0^\circ$) für 2500 K (orange) und 6000 K (blau).	113
Abb. 5-14:	Schwellenerhöhungen (T_I) für Blendung (B), Blendung + Starkregen (B+Rst), Blendung + Sprühregen (B+Rsp) und nach dem Modell von HOLLADAY bei Lichtfarben von jeweils 2500 K (oben) und 6000 K (unten).	115
Abb. 5-15:	Einfluss der Wechselwirkung zwischen Blendung und Regenart auf die Detektionsschwelle.	117

Anhang A1

Abb. A.1-1:	Psychometrische Kurven für 2500-0,3-N.	130
Abb. A.1-2:	Psychometrische Kurven für 2500-1,0-N.	131
Abb. A.1-3:	Psychometrische Kurven für 2500-3,0-N.	132
Abb. A.1-4:	Psychometrische Kurven für 2500-1,0-Rst.	133
Abb. A.1-5:	Psychometrische Kurven für 2500-1,0-Rsp.	134
Abb. A.1-6:	Psychometrische Kurven für 2500-1,0-B.	135
Abb. A.1-7:	Psychometrische Kurven für 2500-1,0-B+Rst.	136
Abb. A.1-8:	Psychometrische Kurven für 2500-1,0-B+Rsp.	137
Abb. A.1-9:	Psychometrische Kurven für 4000-0,3-N.	138
Abb. A.1-10:	Psychometrische Kurven für 4000-1,0-N.	139
Abb. A.1-11:	Psychometrische Kurven für 4000-3,0-N.	140
Abb. A.1-12:	Psychometrische Kurven für 6000-0,3-N.	141
Abb. A.1-13:	Psychometrische Kurven für 6000-1,0-N.	142
Abb. A.1-14:	Psychometrische Kurven für 6000-3,0-N.	143
Abb. A.1-15:	Psychometrische Kurven für 6000-1,0-Rst.	144
Abb. A.1-16:	Psychometrische Kurven für 6000-1,0-Rsp.	145
Abb. A.1-17:	Psychometrische Kurven für 6000-1,0-B.	146
Abb. A.1-18:	Psychometrische Kurven für 6000-1,0-B+Rst.	147
Abb. A.1-19:	Psychometrische Kurven für 6000-1,0-B+Rsp.	148
Abb. A.1-20:	Psychometrische Kurven für Mint-0,3-N.	149
Abb. A.1-21:	Psychometrische Kurven für Mint-1,0-N.	150
Abb. A.1-22:	Psychometrische Kurven für Mint-3,0-N.	151

Anhang A2

Abb. A.2-1:	Relative Spektralverläufe der adaptationsbestimmenden Lichtfarben von 2500 K (links oben), 4000 K (rechts oben), 6000 K (links unten) und Mint (rechts unten) bei $L_{\text{adapt}} = 0,3 \text{ cd/m}^2$	153
Abb. A.2-2:	Relative Spektralverläufe der adaptationsbestimmenden Lichtfarben von 2500 K (links oben), 4000 K (rechts oben), 6000 K (links unten) und Mint (rechts unten) bei $L_{\text{adapt}} = 1,0 \text{ cd/m}^2$	154
Abb. A.2-3:	Relative Spektralverläufe der adaptationsbestimmenden Lichtfarben von 2500 K (links oben), 4000 K (rechts oben), 6000 K (links unten) und Mint (rechts unten) bei $L_{\text{adapt}} = 3,0 \text{ cd/m}^2$	155

Tabellenverzeichnis

Kapitel 2

Tab. 2-1:	Regenklassen nach [DIN IEC 60721-2].....	22
-----------	--	----

Kapitel 3

Tab. 3-1:	Studien zur Objektdetektion bei normalen Sehbedingungen.....	31
Tab. 3-2:	Studien zur Objektdetektion bei erschwerten Sehbedingungen.....	35
Tab. 3-3:	Forschungshypothesen.	43

Kapitel 4

Tab. 4-1:	Übersicht der Versuchsvariablen.	46
Tab. 4-2:	Antwortschema der Signaldetektionstheorie (SDT).....	50
Tab. 4-3:	Leuchtdichtefaktoren der Projektionswand.	54
Tab. 4-4:	Soll- und Messdaten sowie ND-Filter der Versuchsbedingungen.....	56
Tab. 4-5:	Geometrische Daten der Blendquellen.....	58
Tab. 4-6:	Photometrische Daten der Blendquellen für $CCT = 2500\text{ K}$ bei $L_{\text{adapt}} = 1,0\text{ cd/m}^2$	60
Tab. 4-7:	Photometrische Daten der Blendquellen für $CCT = 6000\text{ K}$ bei $L_{\text{adapt}} = 1,0\text{ cd/m}^2$	60
Tab. 4-8:	Versuchsmatrix.....	65
Tab. 4-9:	Übersicht der konstanten Versuchsparameter.....	69
Tab. 4-10:	Ergebnisse der ANOVA für normale Sehbedingungen.....	80
Tab. 4-11:	Ergebnisse der ANOVA für erschwerte Sehbedingungen.	80
Tab. 4-12:	Messparameter der LMK.....	87
Tab. 4-13:	Übersicht der Messunsicherheiten.	89

Kapitel 5

Tab. 5-1:	Leuchtdichteschwellen bei normalen Sehbedingungen.	95
Tab. 5-2:	Kontrastschwellen bei normalen Sehbedingungen.	96
Tab. 5-3:	Schwellenfaktoren bei normalen Sehbedingungen.	97
Tab. 5-4:	Vergleich der gemessenen Schwellen mit dem Modell von ADRIAN.	98
Tab. 5-5:	Photopische und skotopische Leuchtdichten sowie s/p -Verhältnisse der Untersuchungssituationen.....	102
Tab. 5-6:	Leuchtdichteschwellen bei Regen.....	106
Tab. 5-7:	Leuchtdichteschwellen bei Blendung mit und ohne Regen.....	110
Tab. 5-8:	Schleierleuchtdichten und TI -Werte.	114
Tab. 5-9:	Verhältnisse zwischen experimentellen und modellbasierten TI -Werten.	116

Anhang A1

Tab. A.1-1:	Leuchtdichteunterschiede der Testreize für 2500-0,3-N.	130
Tab. A.1-2:	Leuchtdichteunterschiede der Testreize für 2500-1,0-N.	131
Tab. A.1-3:	Leuchtdichteunterschiede der Testreize für 2500-3,0-N.	132
Tab. A.1-4:	Leuchtdichteunterschiede der Testreize für 2500-1,0-Rst.	133
Tab. A.1-5:	Leuchtdichteunterschiede der Testreize für 2500-1,0-Rsp.	134
Tab. A.1-6:	Leuchtdichteunterschiede der Testreize für 2500-1,0-B.	135
Tab. A.1-7:	Leuchtdichteunterschiede der Testreize für 2500-1,0-B+Rst.	136
Tab. A.1-8:	Leuchtdichteunterschiede der Testreize für 2500-1,0-B+Rsp.	137
Tab. A.1-9:	Leuchtdichteunterschiede der Testreize für 4000-0,3-N.	138
Tab. A.1-10:	Leuchtdichteunterschiede der Testreize für 4000-1,0-N.	139
Tab. A.1-11:	Leuchtdichteunterschiede der Testreize für 4000-3,0-N.	140
Tab. A.1-12:	Leuchtdichteunterschiede der Testreize für 6000-0,3-N.	141
Tab. A.1-13:	Leuchtdichteunterschiede der Testreize für 6000-1,0-N.	142
Tab. A.1-14:	Leuchtdichteunterschiede der Testreize für 6000-3,0-N.	143
Tab. A.1-15:	Leuchtdichteunterschiede der Testreize für 6000-1,0-Rst.	144
Tab. A.1-16:	Leuchtdichteunterschiede der Testreize für 6000-1,0-Rsp.	145
Tab. A.1-17:	Leuchtdichteunterschiede der Testreize für 6000-1,0-B.	146
Tab. A.1-18:	Leuchtdichteunterschiede der Testreize für 6000-1,0-B+Rst.	147
Tab. A.1-19:	Leuchtdichteunterschiede der Testreize für 6000-1,0-B+Rsp.	148
Tab. A.1-20:	Leuchtdichteunterschiede der Testreize für Mint-0,3-N.	149
Tab. A.1-21:	Leuchtdichteunterschiede der Testreize für Mint-1,0-N.	150
Tab. A.1-22:	Leuchtdichteunterschiede der Testreize für Mint-3,0-N.	151

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzungen

ANOVA	Analysis of variance (dt. Varianzanalyse)
Art-Net	Datenprotokoll zur Übertragung von DMX-Signalen über Ethernet
AV	Abhängige Variable
B	Blendung
BQ	Blendquelle
CCT	Correlated Colour Temperature (dt. ähnlichste Farbtemperatur)
CDM	Halogenmetall dampflampe (Proprietäre Lampenbezeichnung)
CIE	Commission Internationale de l'Éclairage
CPO	Halogenmetall dampflampe (Proprietäre Lampenbezeichnung)
CRT	Cathode Ray Tube (dt. Kathodenstrahlröhre)
DMX	Digital Multiplex
DVI	Digital Visual Interface
FA	Falscher Alarm
GFDL	GNU Free Documentation License
GL	Glühlampe
GUI	Graphical User Interface (dt. grafische Benutzeroberfläche)
H	Hypothese
H_0	Nullhypothese
H_1	Alternativhypothese
HgL	Quecksilberdampf hochdrucklampe
HGL	Halogenglühlampe
HPM	Quecksilberhochdrucklampe (engl. High Pressure Mercury)
HPS	Natriumhochdrucklampe (engl. High Pressure Sodium)
KV	Korrekte Verneinung
LAS	Lighting Application Suite
LCD	Liquid Crystal Display (dt. Flüssigkristallanzeige)
LED	Licht emittierende Diode
LM	Leuchtmittel
LMK	Leuchtdichtemesskamera (Typ: <i>LMK98-3 color</i>)
LP	Lichtpunkt
LPA	Lichtpunktabstand
LPH	Lichtpunkthöhe
LPS	Natriumniederdrucklampe (engl. Low Pressure Sodium)

LS	Leuchtstoff
LSL	Leuchtstofflampe
L-Zapfen	Photorezeptor mit maximaler spektraler Empfindlichkeit im Bereich langer Wellenlängen des sichtbaren Spektrums
ME	Motorway Europe (dt. europäische Straße)
MH	Metallhalogenlampe (engl. Metal Halide)
MIDI	Musical Instrument Digital Interface (dt. Digit. Schnittstelle f. Musikinstrum.)
MW	Mittelwert
M-Zapfen	Photorezeptor mit maximaler spektraler Empfindlichkeit im Bereich mittlerer Wellenlängen des sichtbaren Spektrums
NA	Natriumdampf Lampe
ND-Filter	Neutralsichtfilter
PB	Pandoras Box
R	Regen
Rsp	Sprühregen
Rst	Starkregen
RB	Referenzbedingung
RS-232	Serielle asynchrone Schnittstelle
SDT	Signal detektionstheorie
SON	Natriumdampf Lampe (Proprietäre Lampenbezeichnung)
St	Stäbchen
S-Zapfen	Photorezeptor mit maximaler spektraler Empfindlichkeit im Bereich kurzer Wellenlängen des sichtbaren Spektrums
T	Treffer
th	Threshold (dt. Schwelle)
TUI	Technische Universität Ilmenau
USB	Universal Serial Bus
UV	Unabhängige Variable
v	Veiling (dt. Schleier)
V	Verpasser
VB	Versuchsbedingung
VBA	Visual Basic for Applications
VP	Versuchsperson(en), Versuchsperson(en)
XML	Extensible Markup Language
Za	Zapfen

Symbole (Lateinisch)

ΔE	Abweichung der Beleuchtungsstärke
ΔL	Leuchtdichteunterschied (zwischen Objekt und Umgebung)
ΔL_B	Leuchtdichteunterschied mit Blendung
ΔL_{th}	Leuchtdichteunterschiedsschwelle (Leuchtdichteschwelle)
$\Delta L_{th,Ind}$	Leuchtdichteschwelle einer einzelnen Versuchsperson (Individualschwelle)
$\Delta L_{th,Kol}$	Leuchtdichteschwelle gemittelt über das Kollektiv (Kollektivschwelle)
Δx	Verschiebung in x-Richtung
Δy	Verschiebung in y-Richtung
a	Abstand
A_{adapt}	Fläche des Adaptationsfeldes
A_{Mess}	Fläche einer Messregion
A	Alter des Beobachters
A_{MED}	Mittleres Alter (Median) des Beobachterkollektivs
A_{MW}	Mittleres Alter (Mittelwert) des Beobachterkollektivs
b	Breite
CCT_{adapt}	Ähnlichste Farbtemperatur des adaptationsbestimmenden Feldes
CI	Confidence Interval (dt. Konfidenzintervall)
d	Durchmesser
d_R	Durchmesser der Regentropfen
$d_{Rsp(MED)}$	Mittlerer Durchmesser (Median) der Regentropfen bei Sprühregen
$d_{Rst(MED)}$	Mittlerer Durchmesser (Median) der Regentropfen bei Starkregen
df	Freiheitsgrad
df_{Err}	Freiheitsgrad der nicht erklärten Varianz
df_{Fak}	Freiheitsgrad der erklärten Varianz
E	Beleuchtungsstärke
E_B	Blendbeleuchtungsstärke am Auge in vertikaler Ebene
F	F-Wert
f_1'	Fehler der $v(\lambda)$ -Anpassung
f_B	Gesamtunsicherheit der Blendwirkung
$f_{B,Proj.Shift}$	Abweichung des Blendwinkels durch Positionierungsungenauigkeit der Projektion (des Versuchsbildes) bezüglich des Referenzpunktes
$f_{BQ,Pos}$	Abweichung der Blendquellenposition
$f_{LMK,ges}$	Gesamtfehler der LMK
$f_{LMK,Pos}$	Abweichung durch Positionierungsungenauigkeit der LMK
$f_{Obj.Gr}$	Abweichung der Objektgröße
$f_{Obj.Pos}$	Abweichung der Objektposition
$f_{Proj.Tilt}$	Abweichung der Projektion von der horizontalen Achse durch Neigung

h	Höhe
HSD	Honest Significant Difference
$I(\lambda)$	Lichtstärke
$I_0(\lambda)$	Ausgangslichtstärke
I_R	Regenintensität
j	Bezugsgröße
k	Altersfaktor
K	Kontrast
K_{th}	Kontrastschwelle
l	Länge
L	Leuchtdichte
L_{adapt}	Adaptationsleuchtdichte
L_{BQ}	Blendquellenleuchtdichte
L_m	Mittlere Leuchtdichte
L_{Obj}	Objektleuchtdichte
L_U	Umfeldleuchtdichte
L_v	Schleierleuchtdichte
MQS	Mittlere quadratische Abweichung
n_{Fak}	Anzahl der zu vergleichenden Faktoren
$n_{St/Za}$	Verhältnis der Anzahl von Stäbchen (St) zu Zapfen (Za)
n_{VP}	Stichprobenumfang
p	Detektionswahrscheinlichkeit
p_{th}	Schwellendetektionsrate
p_{Irr}	Irrtumswahrscheinlichkeit
p_{FA}	Antwortrate für ‚Falsche Alarme‘
p_{KV}	Antwortrate für ‚Korrekte Verneinung‘
p_T	Antwortrate für ‚Treffer‘
p_v	Antwortrate für ‚Verpasser‘
q_0	Mittlerer Leuchtdichtekoeffizient
q_{krit}	Kritischer Kennwert des HSD-Tests
QS	Quadratsumme (Maß für die Abweichung)
QS_{Err}	Zufällig bedingte (nicht durch das Untersuchungsmodell erklärte) Abweichung
QS_{Fak}	Faktoriell bedingte Abweichung
QS_{Ges}	Gesamtabweichung
QS_{Mod}	Durch das Untersuchungsmodell bedingte (erklärte) Abweichung

R^2_{adj}	Korrigiertes Bestimmtheitsmaß
R_a	Farbwiedergabeindex
s	Parameter des Regressionsmodells
s/p	Verhältnis zwischen skotopisch und photopisch bewerteter Strahlungsleistung
SE	Standard Error (dt. Standardfehler)
SF	Schwellenfaktor
SR	Surround Ratio (dt. Umgebungsverhältnis der Beleuchtungsstärke)
t	Zeit
t_{adapt}	Adaptationszeit bei Dunkeladaptation
$t_{\text{adapt,VR}}$	Adaptationszeit vor jeder Versuchsreihe
t_{BQ}	Einschaltdauer der Blendquellen
t_{Obj}	Darbietungsdauer des Sehobjekts
T	Temperatur
TI	Threshold Increment (dt. Schwellenerhöhung)
TI_{EICHHOFF}	Schwellenerhöhung nach EICHHOFF
U	Spannung (elektrische)
U_0	Gesamtgleichmäßigkeit
U_l	Längsgleichmäßigkeit
$v_{2^\circ}(\lambda)$	Hellempfindlichkeitskurve der Zapfen (für ein 2° -Feld)
$v'_{10^\circ}(\lambda)$	Hellempfindlichkeitskurve der Stäbchen (für ein 10° -Feld)
w	Wegstrecke durch ein optisches Medium
x	x-Koordinate des Bezugssystems
x_{CIE}	Farbwertanteil des CIE-Normvalenzsystems
y	y-Koordinate des Bezugssystems
y_{CIE}	Farbwertanteil des CIE-Normvalenzsystems
z	z-Koordinate des Bezugssystems

Symbole (Griechisch)

α	Konfidenzniveau
α_0	Signifikanzniveau
α_{BQ}	Größe der Blendquelle
α_{Obj}	Größe des Sehobjekts
$\alpha(\lambda)$	Spektraler Absorptionskoeffizient
β	Leuchtdichtefaktor
γ	Neigungswinkel
$\delta(\lambda)$	Spektraler Streukoeffizient
θ	Blickwinkel (bezüglich der zentralen Sehachse)
θ_B	Blendwinkel (bezüglich der zentralen Sehachse)
θ_{Obj}	Objektwinkel (bezüglich der zentralen Sehachse)
λ	Wellenlänge
$\lambda_{L,max}$	Maximale spektrale Empfindlichkeit der L-Zapfen
$\lambda_{M,max}$	Maximale spektrale Empfindlichkeit der M-Zapfen
$\lambda_{S,max}$	Maximale spektrale Empfindlichkeit der S-Zapfen
$\lambda_{St,max}$	Maximale spektrale Empfindlichkeit der Stäbchen
$\lambda_{Za,max}$	Maximale spektrale Empfindlichkeit der Zapfen
μ	Mittelwert
$\mu(\lambda)$	Spektraler Extinktionskoeffizient (Abschwächungskoeffizient)
σ	Standardabweichung
$\tau(\lambda)$	Spektraler Transmissionsgrad
Φ	Lichtstrom
φ_{adapt}	Lichtfarbe des Adaptationsfeldes (Adaptationsbestimmende Lichtfarbe)
φ_{BQ}	Lichtfarbe der Blendquellen
Ω_{BQ}	Raumwinkel der Blendquelle

Literaturverzeichnis

- [ADRIAN 1989] ADRIAN, W.: *Visibility of targets: Model for calculation*. In: *Lighting Research and Technology*, 1989. Vol. 21(4), S. 181-188.
- [ADRIAN 1993] ADRIAN, W.; GIBBONS, R.: *Visibility level und die Sichtbarkeit in der Straßenbeleuchtung*. In: *Licht*, 1993, Heft 10, S. 734-739.
- [ALFERDINCK 2006] ALFERDINCK, J. W. A. M.: *Target detection and driving behaviour measurements in a driving simulator at mesopic light levels*. In: *Ophthalmic and Physiological Optics*, 2006. Vol. 26(3), S. 264-280.
- [ARMBRUSTER 2000] ARMBRUSTER, D.: *Optimierung der visuellen Informationsübermittlung durch adaptive Kraftfahrzeugsignalleuchten*. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, 2000.
- [AUGUSTIN 2001] AUGUSTIN, A. J.: *Augenheilkunde*. Springer-Verlag, 2. Auflage, 2001.
- [AULHORN 1964] AULHORN, E.: *Über die Beziehung zwischen Lichtsinn und Sehschärfe*. In: *v. Graefes Archiv für Ophthalmologie*, 1964, Vol. 167, S. 4-74.
- [BAER 2006] BAER, R. (HRSG.); BILLY, H.; CARRARO, U.; ECKERT, M.; GALL, D.; SCHNOR, R.: *Beleuchtungstechnik Grundlagen*. Verlag Technik, 3. Auflage, 2006.
- [BARTLEY 1938] BARTLEY, S. H.: *Subjective brightness in relation to flash rate and the light-dark ratio*. In: *Journal of Experimental Psychology*, 1938, Vol. 23(3), S. 313.
- [BARTLEY 1951] BARTLEY, S. H.: *Intermittent photopic stimulation at marginal intensity levels*. In: *Journal of Psychology*, 1951, Vol. 32, S. 217.
- [BERKE 1999] BERKE, A.: *Biologie des Auges*. Wissenschaftliche Vereinigung für Augenoptik und Optometrie e. V. (WVAO), 1999.
- [BLUMTRITT 2004] BLUMTRITT, S.: *Farbmanagement im mesopischen Helligkeitsbereich*. Diplomarbeit. Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik, 2004.
- [BOMMEL 1980] VAN BOMMEL, W. J. M.; DE BOER, J.B.: *Road Lighting*. Macmillan, London, 1980.

- [BOMMEL 2015] VAN BOMMEL, W. J. M.: *Road Lighting*. Springer-Verlag, 2. Auflage, 2015.
- [BORTZ 1993] BORTZ, J.: *Statistik für Sozialwissenschaftler*. Springer-Verlag, 4. Auflage, 1993.
- [BORTZ 2010] BORTZ, J.; SCHUSTER, C.: *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*. Springer-Verlag, 7. Auflage, 2010.
- [BOYCE 2012] BOYCE, P.: *Achieving good lighting (Editorial)*. In: *Lighting Research and Technology*, 2012. Vol. 44 (2), S. 93.
- [BREITMEYER 1990] BREITMEYER, B. G.; WILLIAMS, M. C.: *Effects of isoluminant background color on metacontrast and stroboscopic motion: Interactions between sustained (P) and transient (M) channels*. In: *Vision Research*, 1990, Vol. 30(7), S. 1069.
- [BROSCHMANN 2011] BROSCHMANN, D.; KUCHENBECKER, J.: *Tafeln zur Prüfung des Farbsinnes*. Thieme Verlag, 34. Auflage, 2011.
- [BS 5489-1] BRITISH STANDARDS INSTITUTION (BSI): *BS5489-1:2003, Code of practice for the design of road lighting: Part 1, Lighting of roads and public amenity areas*. London: BSI, 2003.
- [BUITEVELD 1994] BUITEVELD, H.; HAKVOORT, J. H. M.; DONZE, M.: *The optical properties of pure water*. In: *Proceedings of the SPIE, Ocean Optics XII*, 1994. Vol. 2258, S. 174-183.
- [BULLOUGH 2000] BULLOUGH, J. D.; REA, M. S.: *Simulated driving performance and peripheral detection at mesopic and low photopic light levels*. In: *Lighting Research and Technology*, 2000, Vol. 32(4), S. 194-198.
- [BULLOUGH 2001] BULLOUGH, J. D., REA, M. S.: *Driving in snow: effect of headlamp color at mesopic and photopic light levels*. In: *Society of Automotive Engineers Technical Paper Series*, 2001, No. 2001-01-0320.
- [CAMPBELL 1965] CAMPBELL, F. W.; GREEN, D. G.: *Monocular versus binocular visual acuity*. In: *Nature*, 1965, Vol. 208, S. 191-192.
- [CARRARO 2008] CARRARO, U.: *Lichtanwendung in der Außenbeleuchtung*. 2008.
- [CIE-012.2 1977] COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE: *Empfehlungen für die Beleuchtung von Strassen für den Kraftfahrzeugverkehr*. In: *CIE Publication 12.2*, 1977.
- [CIE-017.4 1987] COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE: *Internationales Wörterbuch der Lichttechnik*. In: *CIE Publication 17.4*, 1987.

- [CIE-018.2 1983] COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE: *The basis of physical photometry*. In: CIE Publication 18.2, 1983.
- [CIE-041 1994] COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE: *Light as a true visual quantity: Principles of measurement*. In: CIE Publication 41 (Reprint), 1994.
- [CIE-081 1989] COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE: *Mesopic photometry: History, special problems and practical solutions*. In: CIE Publication 81, 1989.
- [CIE-095 1992] COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE: *Contrast and visibility*. In: CIE Publication 95, 1992.
- [CIE-100 1992] COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE: *Fundamentals of the visual task of night driving*. In: CIE Publication 100, 1992.
- [CIE-115 2003] COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE: *Recommendations for the lighting of roads for motor and pedestrian traffic*. In: CIE Publication 115, 2003.
- [CIE-136 2000] COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE: *Guide to the lighting of urban areas*. In: CIE Publication 136, 2000.
- [CIE-146 2002] COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE: *Equations for disability glare*. In: CIE Publication 146, 2002.
- [CIE-191 2010] COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE: *Recommended System for Mesopic Photometry based on Visual Performance*. In: CIE Publication 191, 2010.
- [CURCIO 1990] CURCIO, C. A.; SLOAN, K. R.; KALINA, R. E.; HENDRICKSON, A. E.: *Human Photoreceptor Topography*. In: Journal of Comparative Neurology. 1990, Vol. 292(4), S. 497-523.
- [DAVOUDIAN 2014] DAVOUDIAN, N.; RAYNHAM, P.; BARRETT, E.: *Disability glare: A study in simulated road lighting conditions*. In: Lighting Research and Technology, 2014, Vol. 46, S. 695-705.
- [DIN 13201-1] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *Straßenbeleuchtung – Auswahl der Beleuchtungsklassen*. DIN 13201-1, Beuth Verlag, 2004.
- [DIN 5031-2] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik – Strahlungsbewertung durch Empfänger*. DIN 5031-2, Beuth Verlag, 1982.
- [DIN 5044-1] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *Ortsfeste Verkehrsbeleuchtung*. DIN 5044-1, Beuth Verlag, 1981.

- [DIN EN 12464-2] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Arbeitsplätze im Freien*. DIN EN 12464-2, Beuth Verlag, 2007.
- [DIN EN 13201-2] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *Straßenbeleuchtung – Güte-merkmale*. DIN EN 13201-2, Beuth Verlag, 2003.
- [DIN EN 13201-3] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *Straßenbeleuchtung – Berechnung der Güte-merkmale*. DIN EN 13201-3, Beuth Verlag, 2003.
- [DIN IEC 60721-2] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *Klassifizierung von Umweltbedingungen*. DIN IEC 60721-2, Beuth Verlag, 1992.
- [ECKERT 1993] ECKERT, M.: *Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr*. Verlag Technik, 1. Auflage 1993.
- [ECKERT 1996] ECKERT, M.: *Aussenbeleuchtung: Sicherheit und Effektivität*. Die Bibliothek der Technik, Band 123, Moderne Industrie, 1996.
- [EICHHOFF 1970] EICHHOFF, L.: *Möglichkeiten zur quantitativen Erfassung der physiologischen Blendung*. In: *Lichttechnik*, 1970, Vol. 22(4), S. 185.
- [FAIRCHILD 2005] FAIRCHILD, M. D.: *Color Appearance Models*. John Wiley & Sons Ltd., 2. Auflage, 2005.
- [FLECK 1988] FLECK, H. J.: *Periphere Wahrnehmung und Gesichtspunkte für die Darbietung visueller Information*. In: *Licht*, 1988, Heft 5.
- [FOTIOS 2005] FOTIOS, S.; CHEAL, C.; BOYCE, P. R.: *Light source spectrum, brightness perception and visual performance in pedestrian environments: a review*. In: *Lighting Research and Technology*, 2005, Vol. 37(4), S. 271-294.
- [FOTIOS 2009] FOTIOS, S.; CHEAL, C.: *Obstacle detection: A pilot study investigating the effects of lamp type, illuminance and age*. In: *Lighting Research and Technology*, 2009, Vol. 41, S. 321-342.
- [FOTIOS 2013] FOTIOS, S.; CHEAL, C.: *Using obstacle detection to identify appropriate illuminances for lighting in residential roads*. In: *Lighting Research and Technology*, 2013, Vol. 45, S. 362-376.
- [FRANCK 2009] FRANCK, N.; STARY, J. (HRSG.): *Die Technik des wissenschaftlichen Arbeitens*. Verlag Ferdinand Schöningh GmbH & Co. KG, 15. Auflage, 2009.
- [FREIDING 2007] FREIDING, A.; ELOHOLMA, M.; KETOMÄKI, J.; HALONEN, L.; WALKEY, H.; GOODMAN, T.; ALFERDINCK, J.; VÁRADY, G.; BODROGI, P.: *Mesopic visual efficiency I: detection threshold measurements*. In: *Lighting Research and Technology*, 2007, Vol. 39(4), S. 319-334.

- [GALL 2004] GALL, D.: *Grundlagen der Lichttechnik (Kompendium)*. Pflaum Verlag, 2004.
- [GOLDSTEIN 2002] GOLDSTEIN, E. B.: *Wahrnehmungspsychologie*. Spektrum Akademischer Verlag GmbH, 2002.
- [GREULE 1985] GREULE, R.; FLECK, H. J.: *Die Wahrnehmbarkeit peripherer Lichtreize bei nächtlichen Straßenleuchten*. In: Licht, 1985, Heft 3.
- [HENTSCHEL 2002] BERNITZ, F.; FISCHER, U.; GRÖBEL, M.; HENTSCHEL, H. J. (HRSG.); SCHMIDT, F.; WEMMER, G.: *Licht und Beleuchtung – Grundlagen und Anwendungen in der Lichttechnik*. Hüthig Verlag, 5. Auflage, 2002.
- [HOLLADAY 1926] HOLLADAY, L. L.: *The fundamentals of glare and visibility*. In: Journal of the Optical Society of America and Review of Scientific Instruments, 1926, Vol. 12(4), S. 271-319.
- [INDITSKY 1982] INDITSKY, B.; BODMANN, H. W.; FLECK, H. J.: *Elements of visual performance*. In: Lighting Research and Technology, 1982, Vol. 14(4), S. 218-231.
- [JAINSKI 1960] JAINSKI, P.: *Die Unterschiedsempfindlichkeit des menschlichen Auges bei verschiedenen Lichtarten*. In: Lichttechnik, 1960, Jahrgang 12(6), S. 355-359.
- [JAINSKI 1962] JAINSKI, P.: *Das Verhalten der Unterschiedsempfindlichkeit bei Blendung mit verschiedenen Lichtarten*. In: Lichttechnik, 1962, Jahrgang 14(2), S. 60-65.
- [KARTHAUS 2013] KARTHAUS, D.; SPIRA, S.: *Optimierung und lichttechnische Charakterisierung einer LED-basierten Blendquellen für Laborversuche*. Medienprojekt/Projektseminar, Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik, 2013.
- [KOKOSCHKA 1972] KOKOSCHKA, S.: *Untersuchungen zur mesopischen Strahlungsbeurteilung*. Dissertation Karlsruhe, 1972.
- [KOLB 2003] KOLB, H.: *How the Retina Works*. In: American Scientist, 2003, Vol. 91(1), S. 28-35.
- [KÖNIG 1889] KÖNIG, A.; BRODHUN, E.: *Experiment. Untersuchungen über die psychophysische Fundamentalformel in Bezug auf den Gesichtssinn*. Zweite Mittlg. S. B. Preussische Akademie der Wissenschaften, 1889, S. 641-660.
- [LACHENMAYR 1995] LACHENMAYR, B. J.: *Sehen und gesehen werden: Sicher unterwegs im Straßenverkehr*. Shaker Verlag, 1995.

- [LACHENMAYR 2006] LACHENMAYR, B.; FRIEDBURG, D.; HARTMANN, E.; BUSER, A.: *Auge-Brille-Refraktion*. Georg Thieme Verlag, 4. Auflage, 2006.
- [LANTHONY 1978] LANTHONY, P.: *The desaturated panel D-15*. In: Documenta Ophthalmologica. 1978, Vol. 46(1), S. 185-189.
- [LEWIS 1999] LEWIS, A. L.: *Visual performance as a function of spectral power distribution of light sources at luminances used for general outdoor lighting*. In: Journal of the Illuminating Engineering Society, 1999, Vol. 28, S. 37-42.
- [LINDNER 1976] LINDNER, H.; KNOCH, H.: *Anpassungsleistungen des optischen Analysators*. Lehrbrief der TH Ilmenau, 1976.
- [LINGARD 2002] LINGARD, R.; REA, M. S.: *Off-Axis Detection at Mesopic Light Levels in a Driving Context*. In: Journal of the Illuminating Engineering Society, 2002, Vol. 31(1), S. 33-39.
- [MORTENSON 1980] MORTENSON BLACKWELL, O.; BLACKWELL, H. R.: *Individual responses to lighting parameters for a population of 235 observers of varying ages*. In: Journal of the Illuminating Engineering Society, 2002, Vol. 9(4), S. 205-232.
- [PAUL 1999-1] PAUL, H. (HRSG.): *Lexikon der Optik (Bd. 1)*. Spektrum Akademischer Verlag GmbH, 1999.
- [PAUL 1999-2] PAUL, H. (HRSG.): *Lexikon der Optik (Bd. 2)*. Spektrum Akademischer Verlag GmbH, 1999.
- [RASCH 2006] RASCH, B.; FRIESE, M.; HOFMANN, W. J.; NAUMANN, E.: *Quantitative Methoden 2. Einführung in die Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler*. Springer-Verlag, 2. Auflage, 2006.
- [RAYNHAM 2004] RAYNHAM, P.: *An examination of the fundamentals of road lighting for pedestrians and drivers*. In: Lighting Research and Technology, 2004, Vol. 36(4), S. 307-316.
- [REEVES 1986] REEVES, A.: *Pathways in type-B (U-shaped) metacontrast*. In: Perception, 1986, Vol. 15(2), S. 163-172.
- [ROSENHAHN 1999] ROSENHAHN, E. O.: *Entwicklung von lichttechnischen Anforderungen an Kraftfahrzeugscheinwerfer für Schlechtwetterbedingungen*. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, 1999.
- [SCHMIDT 1997] SCHMIDT, F.; THEWS, G.: *Physiologie des Menschen*. 27. Auflage, Springer Verlag, 1997.
- [SCHÖBER 1954] SCHÖBER, H.: *Das Sehen (Band II)*. Fachbuchverlag Leipzig, 1954.
- [SCHÖBER 1957] SCHÖBER, H.: *Das Sehen (Band I)*. Fachbuchverlag Leipzig, 1957.

- [STABELL 1981] STABELL, U.; STABELL, B.: *Spectral sensitivity of the dark-adapted extrafoveal retina at photopic intensities*. In: Journal of the Optical Society of America, 1981, Vol. 71(7), S. 841-844.
- [STADLER 1964] STADLER, G.: *Einfluß einer verschmutzten Windschutzscheibe auf die Sichtverhältnisse beim nächtlichen Straßenverkehr*. In: Licht-technik, 16. Jahrgang, Nr. 7/1964, 1964.
- [STILES 1929] STILES, W. S.: *The effect of glare on the brightness difference threshold*. In: Proc. Royal Society London, 1929, Vol. 104(731), S. 322-351.
- [STILES 1937] STILES, W. S.; CRAWFORD, B. H.: *The effect of a glaring light source on extrafoveal vision*. In: Proc. Royal Society London, 1937, Vol. 122(827), S. 255-280.
- [STOCKMAN 1999] STOCKMAN, A.; SHARPE, L. T.; FACH, C.: *The spectral sensitivity of the human short-wavelength sensitive cone derived from thresholds and color matches*. In: Vision Research, 1999, Vol. 39(17), S. 2901-2927.
- [STOCKMAN 2000] STOCKMAN, A.; SHARPE, L. T.: *The spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength-sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype*. In: Vision Research, 2000, Vol. 40(13), S. 1711-1737.
- [TECHNOTeAM 2004] TECHNOTeAM: *FAQ Anwenderseminar 2004*. Informationsbroschüre der TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, 2004.
- [VIAKARI 2012] VIAKARI, M.; PUOLAKKA, M.; HALONEN, L.; RANTAKALLIO, A.: *Road lighting in change: User advice for designers*. In: Lighting Research and Technology, 2012, Vol. 44, S. 171-185.
- [VÖLKER 2006] VÖLKER, S.: *Hell- und Kontrastempfindung – Ein Beitrag zur Entwicklung von Zielfunktionen für die Auslegung von Kfz Scheinwerfern*. Habilitation, Universität Paderborn, 2006.
- [Vos 1978] Vos, J. J.: *Colorimetric and Photometric Properties of a 2° Fundamental Observer*. In: Color Research and Application, 1978, Vol. 3(3), S. 125-128.

„Den Rest meines Lebens werde ich nachdenken, was Licht ist!“

ALBERT EINSTEIN

Dissertation von Andreas Ueberschaer



2010 – 2015